

**Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar**  
**Sporttudományi és Testnevelési Intézet**

# **MOZGÁSSZABÁLYOZÁS**

Szerző

**Atlasz Tamás**

Lektor

**Dr. Radák Zsolt**

Pécs, 2015.

ISBN 978-963-642-668-2



## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. A csontok és izmok felépítése, működése.....</b>	<b>7</b>
1.1. A csontok felépítése.....	7
1.1.1. A csontok szerkezete .....	8
1.2. A csontok alakja .....	8
1.2.1. Csöves csontok .....	8
1.2.2. Lapos csontok.....	8
1.2.3. Kőbős csontok .....	9
1.2.4. Labirintusos vagy légtartalmú (pneumatikus) csontok .....	9
1.3. A csontok összeköttetései .....	9
1.3.1. Folytonos csontösszeköttetések .....	10
1.3.2. Megszakított csontösszeköttetések .....	10
1.4. A harántcsíkt izomszövet felépítése .....	11
1.5. A harántcsíkt izomszövet működése .....	13
1.6. Az elektromechanikai kapcsolat, a triád szerkezete és működése .....	14
1.7. A vázizom kontrakciójának molekuláris mechanizmusa.....	16
1.8. Az izomműködés mechanikai jellemzői .....	18
1.8.1. Az izomkontrakció típusai.....	18
1.8.2. Az izomhossz és az izomfeszülés közötti összefüggés.....	20
1.9. Energiaforrások az izomműködés során .....	21
1.9.1. Anaerob energiaképzés.....	21
1.9.2. Aerob energiaképzés.....	22
1.10. Hőtermelés az izomban .....	23
1.11. A vázizomrostok típusai .....	24
<b>2. Az idegrendszer működésének alapjai.....</b>	<b>26</b>
2.1 Az idegsejt (neuron) felépítése .....	26
2.2. Az ioncsatornák .....	28
2.3. A nyugalmi membránpotenciál kialakulása.....	28
2.4. Az akciós potenciál kialakulása.....	31
2.5. Az akciós potenciál terjedése.....	33
2.6. Az akciós potenciál átadása .....	35
2.6.1. Idegvégződés .....	35
2.6.2. Az elektromos szinapszis (gap junction) .....	37
2.6.3. Kémiai szinapszisok .....	37
2.6.4. A valódi kémiai szinapszisok .....	38
2.6.5. Az ideg-izom kapcsolat (neuromuszkuláris junction) .....	40

<b>3. Az idegrendszer szerveződési szintjei .....</b>	<b>43</b>
3.1. A gerincvelő anatómiája .....	43
3.2. Gerincvelői pályák.....	47
3.2.1. A fehérállomány szerkezete.....	47
3.2.2. Az asszociációs pályák .....	48
3.2.3. Felszálló (afferens) pályák.....	48
3.2.4. Leszálló (efferens) pályák .....	48
3.3. Gerincvelő idegek (nervi spinales) .....	48
3.4. Gerincvelői vázizomreflexek.....	49
3.4.1. Nyújtási (izomeredetű, saját, vagy miotatikus) reflex .....	50
3.4.2. Inverz nyújtási reflex .....	51
3.4.3. Flexor reflex .....	51
3.5. Az agytörzs.....	53
3.5.1. A nyúltagy szerkezeti egységei és funkciói.....	53
3.5.2. A híd szerkezeti egységei és funkciói.....	54
3.5.3. A középagy szerkezeti egységei és funkciói.....	54
3.6. A kisagy.....	55
3.6.1. A kisagy anatómiája .....	55
3.6.2. A kisagy sejtszintű működése.....	55
3.6.3. A kisagy főbb funkcióinak csoportosítása.....	57
3.7. A köztiagy .....	58
3.7.1. Az epitálamusz .....	58
3.7.2. A talamusz.....	58
3.7.3. A hipotalamusz.....	59
3.8. A nagyagy.....	59
3.8.1. A nagyagy lebenyei .....	60
3.8.2. Az agykéreg felépítése.....	61
3.9. Az agyidegek .....	62
3.9.1. Tisztán érző agyidegek .....	62
3.9.2. Tisztán motoros agyidegek.....	63
3.9.3. Kevert agyidegek.....	63
3.10. A limbikus rendszer.....	65
3.10.1. A Papez-kör .....	65
3.10.2. A „szociális agy” és az emberi evolúció.....	65
3.11. Vegetatív idegrendszer .....	66
3.11.1. Paraszimpatikus idegrendszer.....	67
3.11.2. Szimpatikus idegrendszer .....	67

3.11.3. Szimpatikus vagy paraszimpatikus tónust fokozó szerek .....	69
<b>4. Az idegrendszer akaratlagos mozgatóműködései .....</b>	<b>70</b>
4.1. A piramispálya mozgásvezérlése .....	71
4.1.1. Primer motoros kéreg .....	71
4.1.2. Premotor kéreg .....	73
4.1.3. Szupplementer motoros área .....	73
4.1.4. Poszterior parietális agykéreg .....	73
4.2. Az extrapiramidális mozgásvezérlés .....	73
4.2.1. Bazális ganglionok .....	74
4.2.2. Talamusz „nyitás” (közvetlen út) .....	75
4.2.3. Talamusz „zárás” (közvetett út) .....	76
<b>5. Mozgásszabályozásban szerepet játszó legfontosabb érzékszervek működései .....</b>	<b>78</b>
5.1. Látás .....	78
5.1.1. A szem felépítése .....	78
5.1.2. A szem optikai rendszere/A szem fénytörő közegei .....	80
5.1.3. A látás perifériás mechanizmusa/A retina felépítése .....	81
5.1.4. A látás perifériás mechanizmusa/A fototranszdukció .....	82
5.1.5. A látás perifériás mechanizmusa/A transzmitterfelszabadulás .....	83
5.1.6. A látás perifériás mechanizmusa/ Az ingerületterjedés iránya .....	84
5.1.7. A látás centrális mechanizmusa .....	85
5.2. Hallás .....	85
5.2.1. Akusztikai alapfogalmak .....	85
5.2.2. A hallás perifériás mechanizmusai/A külső fül szerepe .....	87
5.2.3. A hallás perifériás mechanizmusai/A középfül szerepe .....	87
5.2.4. A hallás perifériás mechanizmusai/A belső fül felépítése .....	88
5.2.5. A hallás perifériás mechanizmusai/A belső fül működése .....	90
5.2.6. A hallás centrális mechanizmusai .....	91
5.3. Helyzetérzékelés .....	92
5.3.1. A helyzetérzékelés szerve .....	92
5.3.2. A fej szöggyorsulásának detektálása .....	92
5.3.3. A lineáris gyorsulás- és a fej térbeli helyzetének detektálása .....	93
5.3.4. Hová jut a helyzetérzékeléssel kapcsolatos információ? .....	94
<b>6. Magasabb rendű idegi működések .....</b>	<b>95</b>
6.1. Az izomtónus és a testtartás szabályozása .....	95
6.1.1. A vestibuláris magok működésének vázlata .....	95
6.1.2. A Deiters-mag és a formatio reticularis közös szerepe .....	95
6.2. Féltekei dominancia .....	96

6.3. Hasított agyi vizsgálatok .....	98
6.4. Tanulás és memória.....	99
6.4.1. Egyszerű és összetett tanulási formák .....	99
6.4.2. A memóriefajták csoportosítása .....	101
6.4.3. A hosszú távú memóriaképződés sejtes alapja .....	104
<b>7. Tesztkérdések.....</b>	<b>107</b>
<b>8. Felhasznált irodalom .....</b>	<b>111</b>

## **Előszó**

Az olvasó egy olyan összefoglaló elektronikus jegyzetet olvashat, amely tartalmazza a mozgásszabályozás megismeréséhez szükséges legfontosabb alapvető ismereteket egyetemi hallgatók számára.

A tankönyv részletesen elemzi az izom-, valamint az idegrendszer alapvető szerepét a mozgások kivitelezésében, annak szabályozásában. A mű hiánypótló, hiszen hasonló, kifejezetten a neuromuszkuláris rendszerrel foglalkozó írás a mozgásszabályozással kapcsolatosan nem található. A könyv terjedelme több mint 100 oldal, mely 55 ábra segítségével könnyíti meg a tananyag alapvető és egyszerű feldolgozását, annak megértését. A könyvet a szerző elsősorban testnevelő-edző, sportszervező BSc szakos, továbbá bármilyen biológia, rekreáció, valamint egészségtan szakos hallgatóknak ajánlja.

Az elektronikus tananyag megírásának ideje alatt Atlasz Tamás a Nemzeti Kiválóság Magyary Zoltán Posztdoktori Ösztöndíjasa, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai Ösztöndíjasa volt.

A szerző reméli, hogy a jelen formában elkészült elektronikus tananyag hasznos segédanyagként használhatják mind az élettani, mind pedig a mozgásszabályozás kurzusok során.

Pécs, 2015. július

A szerző

# 1. A csontok és izmok felépítése, működése

Mozgás-szervrendszerünk passzív része a csontváz, aktív része a vázizomzat, melyet - tömött rostos kötőszövet - az inak kapcsolnak a csontokhoz.

## 1.1. A csontok felépítése

Az emberi test stabil belső keretre, a csontvázra épül, melynek alapvető tartóoszlopa a gerinc. A csont a természet alkotta egyik legerősebb anyag,  $16,3\text{cm}^3$  csont kb. 8600kg terhelést képes elviselni, ami legalább öt emelődaru erejével vetekszik. Csontvázunk a teljes testtömeg mindössze 10-20%-át teszi ki, azaz a súlya körülbelül 10kg. Egy hasonló mérettel rendelkező acélrúd ennél ötször nehezebb lenne.

Csontvázrendszerünk alapvető funkciói a következők:

- a test **belső szilárd vázát** alkotja, meghatározza annak alakját és méreteit,
- **elhatárolja** és **védi** a külső behatásoktól a testüregben lévő szerveket,
- szivacsos állományában található a szervezet legfontosabb **vérképző** szerve, a vörös csontvelő,
- az emberi test **mozgásának passzív** szerve,
- az emberi szervezet számára fontos ionok, elemek **raktára**, ahonnan a szükséges anyagok megfelelő folyamatokon keresztül mobilizálhatók, pl.  $\text{Ca}^{2+}$ .

Az emberi csontvázat a támasztószövetek csoportjába tartozó csontszövet és porcszövet építi fel. A csontok 40%-a víz, a fennmaradó vízmentes rész szerves és szervetlen alkotórészek adják:

- 35-40% a **szerves alkotórész** (összein), melyek a csont rugalmasságát biztosítják
- 60-70% a **szervetlen alkotórész**, melyek a szilárdságot adják: pl.:  $\text{Ca}^{2+}$ -foszfát,  $\text{Ca}^{2+}$ -hidroxiapatit, illetve kisebb részt mészsók, alkálisók, fluoridok, különböző nyomelemek.

Idős korban a szervetlen anyagok részaránya megnő a rugalmasságot okozó szerves alkotók csökkenése miatt, így a kor előrehaladtával rugalmatlanabbá válnak a csontok, törékenyséjük nagymértékben fokozódik.

### 1.1.1. A csontok szerkezete

A csontok felépítését egy csöves csonton mutatjuk be (1-1. ábra). A csont külső felszínét rostos burok, a **csonthártya** borítja. E csontok középső csőszerű darabját, mely tömött csontállományból (kompakt csontállomány) áll, **diafízis**nek, két vaskosabb végdarabját, **epifízis**nek nevezzük. A törzshöz közelebb levő végét proximális-, a távolabbat disztális epifíziseknek hívjuk. Az epifíziseket (izületi vég) változó vastagságban üvegporc borítja. Mindkét epifízist **szivacsos csontállomány** tölti ki, melynek üregeit fiatal korban **vörös csontvelő** tölti ki, mely az évek múlásával visszahúzódik, helyére **sárga csontvelő** (zsírszövet) kerül.

A csont középső részének üregét **velőüregnek** nevezzük, mely felnőtt korban sárga csontvelőt tartalmaz.

\*Kiegészítés: A vörös csontvelő zsírszövetté való alakulásával a vörösvérsejt-képző funkcióját elveszti, és csak a szervezetet érő nagyobb trauma (pl.: vérvesztés) hatására aktivizálódik.

### 1.2. A csontok alakja

Alak szerint csöves, lapos, köbös és labirintusos csontokat különböztetünk meg, melyeket célszerűbb, ha alak szerinti felosztásukban, a magyar kifejezések szerint definiáljuk.

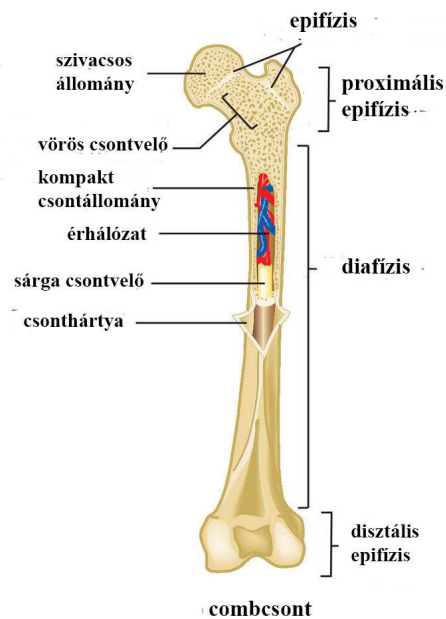
#### 1.2.1. Csöves csontok

Főleg a végtagokban előforduló üreges, cső alakú csontok (szerkezetét lásd előbb). Ilyen, pl.: combcsont, felkarcsont, orsócsont.

#### 1.2.2. Lapos csontok

Jellemzőjük, hogy az élet során mindig megmaradó vörös csontvelővel teltek, így vérképző szervünk oroslánrészét adják. Ilyen pl.: agykoponya csontjai, lapockák, csípőcsontok, a bordák, valamint a mellcsont.





1-1. ábra: A csöves csontok szerkezete

### 1.2.3. Kőbös csontok

Szabálytalan, de különböző irányokban alig eltérő méretű csontok. Ilyen pl.: kéz- és lábtőcsontok, ill. a csigolyák teste. Végtagjaink kőbös csontjai zsírszövetet, a csigolyatestek vörös csontvelőt tartalmaznak.

### 1.2.4. Labirintusos vagy légtartalmú (pneumatikus) csontok

Jelentőségük a szerkezet kisfokú könnyítése mellett a hangadás számára fontos rezonálótér kialakítása. Ilyen pl.: az arcüregben elhelyezkedő homlokcsont.

## 1.3. A csontok összeköttetései

A csontokat részben rögzített, részben mozgékony összeköttetések fűzik egybe. Abban az esetben, ha a csontok anyaga megszakítás nélkül megy át egymásba, akkor folytonos összeköttetésről, ha az összekötött csontok állománya között nincs meg az állandó anyagfolytonosság, akkor **ízületről** beszélhetünk.

### 1.3.1. Folytonos csontösszeköttetések

- **Szalagos csontösszeköttetés**

Pl.: lábszár két alsó csontvége, ide sorolhatjuk a koponyacsontok varratos egybeilleszkedését is.

- **Porcos csontösszeköttetés**

Pl.: csigolya közötti porckorongok, bordák a mellcsonttal.

- **Csontos egybeforradás**

Pl.: medencecsont a növekedés során, a keresztcsont összezsontosodása öt keresztcsonti csigolyából.

### 1.3.2. Megszakított csontösszeköttetések

**Ízületnek** nevezzük azokat az összeköttetéseket, melyeknél a csontfelszínnek közötti rés található. **Ízvégeken** az egymással ízületi összeköttetésben lévő csontrészeket értjük. Az ízvégek között egyrészt egy domború idomú ún. **ízfejet**, ill. egy homorút, az **ízület** tudjuk megkülönböztetni, melyek egy zsákszerű kötőszövetbe, az **ízületi tokba** vannak burkolva. Az ízvégek egymásba illeszkedését szolgáló ízületi felszínnek **ízületi porccal** (üvegporccal) borítottak, melyek megvédik az ízesülő csontvégeket a kopástól.

A csontvégek között néhány cseppnyi nyúlós folyadék, az **ízületi nedv** (*synovia*) található, mely jelentősen csökkenti a mozgásokkal járó súrlódást és mintegy kipárnázza az ízületet a rázkódások elviselésére. Az ízesülő csontokat **ízületi szalagok** rögzítik egymáshoz, melyek szakítási szilárdsága igen nagy. Így pl.: a csípőízület fő szalagja mintegy körülbelül 500kg megterhelésnél szakad el. Laza tokkal és szalagokkal rendelkező, erős izomzattal körülvett ízületekben (pl.: vállízület) az ízvégek egymástól való eltávolodását ficamnak nevezzük, melyet rendszerint az ízületi tok, vagy a szalagok elszakadása kísér.

Az ízületek osztályozhatóak a bennük lévő csontok alapján, így megkülönböztethetünk egyszerű (két csontvég találkozik), ill. összetett (több csont vesz részt) ízületeket.

#### A/ Egyszerű ízületek

- **Szabad ízületek**, melyeket mozgási tengelyeik száma szerint tudjuk csoportosítani

- **Egytengelyű ízületek**

- **Csuklóízület (hengerízület)**

Az elmozdulása a csont hossztengelyére merőleges. Pl.: az ujjpercek között található, szerepe a hajlítás és fesztítés.

- **Forgóízület**

Az elmozdulása a csont hossztengelyére egybeesik. Pl.: az 1. és a 2. nyakcsigolya közötti ízület.

- **Kéttengelyű ízületek**

- **Tojásízület**

Mint a neve is mutatja, tojás alakú ízületi felszínnel rendelkezik, mely két tengely körüli mozgást engedélyez. Pl.: a fej bólogató, ún. „igen-nem” mozgása.

- **Nyeregízület**

Az ízületnek két egymásra merőleges tengelye van. Pl.: hüvelykujj kézközépcsont-kéztőcsont ízülete.

- **Soktengelyű ízületek**

Elmozdulása három fő- és sok melléktengely mentén történhet. Pl.: vállízület, és a combcsont fejének ízülete.

- **Feszés ízületek**

Az ízesülő csontvégek kicsit, ill. egyáltalán nem mozoghatnak. Pl.: csípő és keresztcsont közötti ízület.

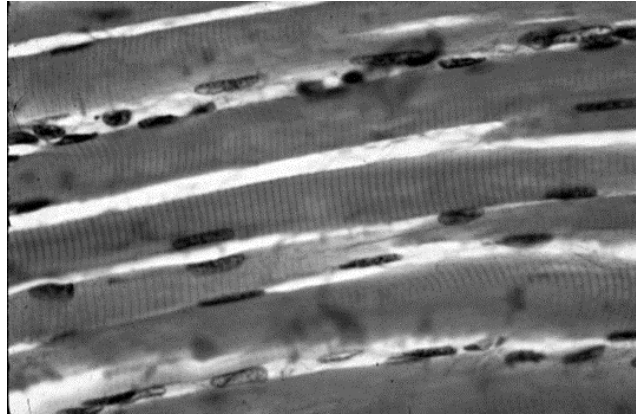
## **B/ Összetett ízületek**

Olyan bonyolult mozgású ízületek tartoznak ebbe a csoportba, melyek kialakításában kettőnél több csont vesz részt. Pl.: könyök és a térd ízülete.

### **1.4. A harántcsíkolt izomszövet felépítése**

Az emberi szervezetben simaizomszövet, harántcsíkolt izomszövet (vázizom, 1-2. ábra), ill. szívizomszövet található. Mivel a mozgásszabályozás kialakításában a

harántcsíkolt izomzat szerepe kimagasló, így a könyvben csak ezen típus felépítésére, működésre térünk ki.

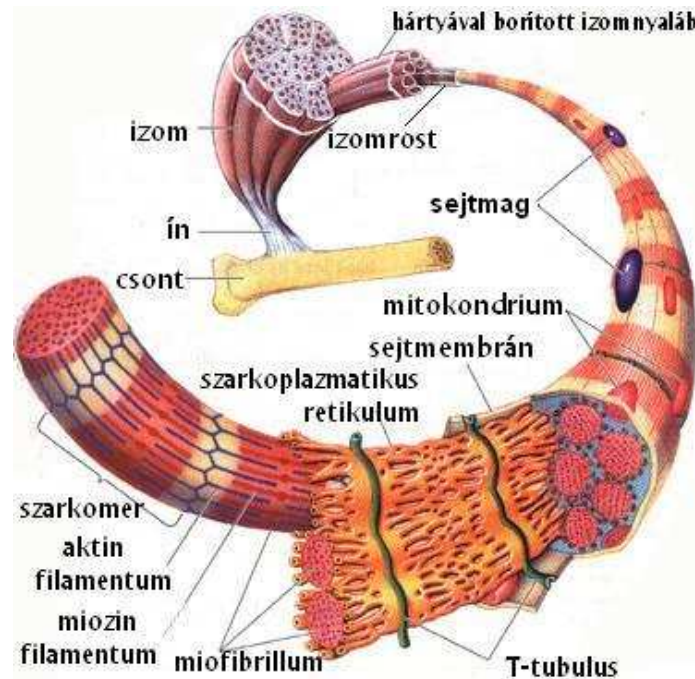


1-2. ábra: A harántcsíkolt izomszövet fénymikroszkópos képe

A mozgás aktív szervrendszerét a vázizomzat adja, mely önálló anatómiai és funkciós egységből, az **izmokból** áll (1-3. ábra). Az izom húsos részét **izomhasnak** nevezzük. A vázizmok, melyek a csontváz meghatározott részeiről erednek, és az izomműködés szempontjából fontos, tömött rostos kötőszövetből álló **ín** segítségével, a csont bizonyos részein tapadnak. Az izmot kívülről **kötőszövetes hártya** borítja. A hártyából válaszfalak indulnak az izom állományába, melyek az izmot **izomnyalábokra** tagolják. Az izomnyalábok **izomrostokból** - azaz sokmagvú izomsejtekből - állnak. Az izomrost a vázizomzat elemi egysége, akciós potenciál generálására képes. Minden egyes izomrosthöz egy speciális szinapszison keresztül (lásd 2.5. fejezet) egy-egy idegrost kapcsolódik. Az idegrost elektromos impulzust juttat tovább az izomrosthöz, melynek hatására az izomrost is ingerületbe kerül (lásd 2.5. fejezet).

Az izomrostokat egy speciális hártya, a **szarkolemma** borítja. Az izomrostok belsejében ún. **miofibrillumok** futnak, melyek általában az izomrost hosszával megegyező hosszúságúak. A miofibrillumokat a sejt belső membránrendszere, a **szarkoplazmatikus retikulum** veszi körül. A miofibrillumok **miofilamentumokból** épülnek fel, amelyek az elmozduláshoz szükséges fehérjéket tartalmazzák. A vastag filamentumokat **miozinnak**, a vékonyakat, **aktinnak** nevezzük. A miozin filamentumnak egy feji- és egy farki részét tudjuk elkülöníteni. A feji részével egyrészt csatlakozni képes

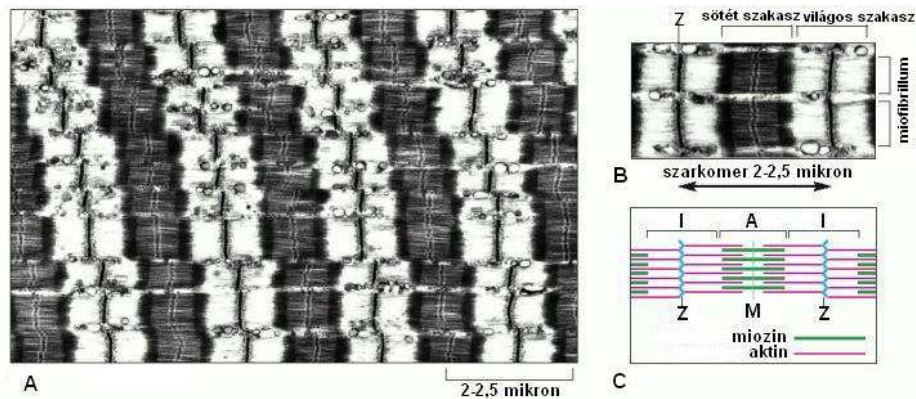
a másik miofilamentumhoz, az aktinhoz, másrészt a fej elhajlása okozza a harántcsíkolt izom rövidülését (lásd 1.7. fejezet).



1-3. ábra: A vázizmok felépítése

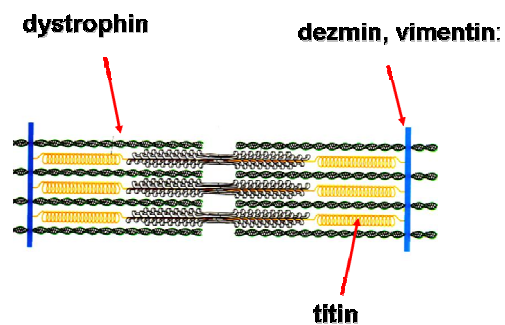
### 1.5. A harántcsíkolt izomszövet működése

A harántcsíkolt izmokban az aktin- és miozinfehérjék szabályos rendezettsége alakítja ki a harántcsíkolt jelleget. Megfigyelhető, hogy a rostok hossz tengelye mentén sötétebb és világosabb szakaszok váltakoznak. A sötét szakaszt „**A**” csíknak, míg a világost, „**I**” csíknak hívjuk. Az „**A**” csík közepén egy világosabb „**H**” csík található, közepén az ún. „**M**” zónával. Az „**I**” csíkok közepén a „**Z**” lemezt figyelhetjük meg. A miofibrillum két Z lemez közötti szakaszát **szarkomer**nek nevezzük, melynek hossza nyugalomban 2-2,5 $\mu$ m (1-4. ábra).



1-4. ábra: A szarkomer elektronmikroszkópos képe (A) és szerkezete (B, C).

A harántcsíkolt izom szerkezetét egyéb stabilizáló fehérjék is alkotják (1-5. ábra). Ezek közül elsőként érdemes megjegyezni a **dystrophin** nevű fehérjét, mely az aktin és izom-membrán fehérjék közötti kapcsolatot teremti meg. Hiánya a *muscularis dystrophia* nevű betegséget okozza. Megemlítendő a **dezmin**, illetve a **vimentin** fehérjék, melyek az egyes Z lemezeket fűzik össze, valamint a **titin**, mely a miozin centrális helyzetben tartásáért felelős.



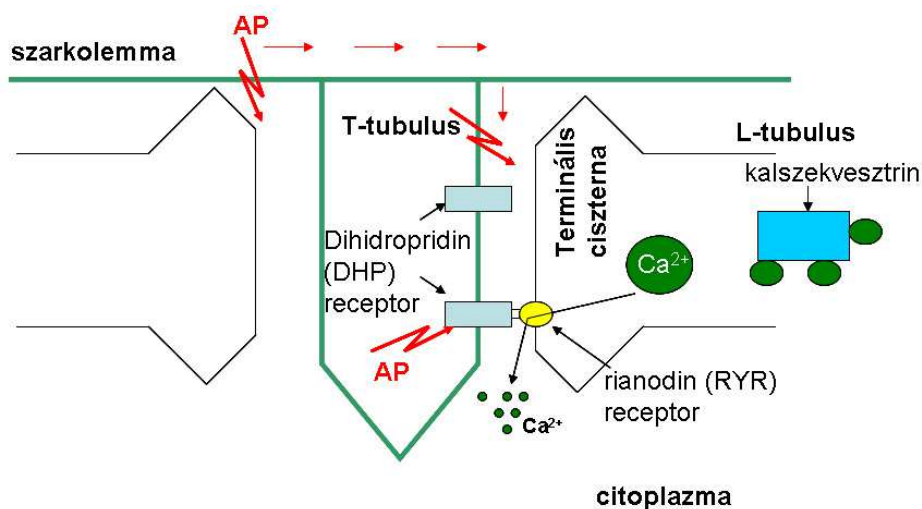
1-5. ábra: A harántcsíkolt izom legfontosabb stabilizáló fehérjéi

## 1.6. Az elektromechanikai kapcsolat, a triád szerkezete és működése

A vázizomzat működésének alapvető formája az izomrostok kontrakciója. Az izomrostokat körülvevő **membránon** (**szarkolemma**) keletkező és terjedő akciós potenciál (lásd később, 2.3. fejezet) és az izom rángása közötti időszakat **latenciaidőnek**

nevezzük, melynek értéke 2-4 ms. Ezen idő alatt azon folyamatok lezajlásához szükséges, amelyek a felszíni membrán potenciálváltozása és a kontrakció kialakulás között mennek végbe. Mindezeket összefoglaló néven **elektromechanikai csatolásnak** nevezzük. A csatolás első meghatározó lépése az akciós potenciál terjedése az ún. T-tubulusok membránján az izomrost belsejébe.

A **T-tubulusok** az emlősökben az I- és az A-csík határán elhelyezkedő **szarkolemma betüremkedés** (1-6. ábra), mely képes akciós potenciál generálására és vezetésére. A vezetési tulajdonságának köszönhetően képes a felszíni membrántól távolabb eső miofibrillumok területére vezetni a potenciálváltozást. A másik rész, mely a **szarkoplazmatikus retikulumból** áll (**L tubulus**) kiszélesedett résszel (terminális ciszterna) egészen közel kerülnek a rost belsejébe nyúló T-tubulusokhoz. Emlősökben egy T-tubulushoz két oldalról kapcsolódik egy-egy **terminális ciszterna**, melyet összefoglaló néven **triádnak** nevezünk. A szoros kapcsolat ellenére a két struktúra között összeköttetés nem található, membránjaik között mintegy 10-15 nm-es rés mutatható ki. A terminális ciszternák az izomrost  $\text{Ca}^{2+}$  raktárának felelnek meg, bennük a  $\text{Ca}^{2+}$ -ion szabadon, vagy egy speciális fehérjéhez, a **kalszekvesztrin**hez kötve található. A T-tubulus membránjában egy speciális fehérje, az úgynevezett **dihidropiridin (DHP) receptor** található. A fehérjemolekula a membránpotenciál változásának hatására szerkezeti változáson megy keresztül, ami elősegíti az L-tubulus terminális ciszternáiban lokalizálódó **rianodin (RYR) receptorok** megnyílását. Ezek a rianodin-receptorok speciális  $\text{Ca}^{2+}$  csatornaként szolgálnak, melyek megnyitása lehetővé teszi, hogy a szarkoplazmatikus retikulumban található  $\text{Ca}^{2+}$  raktárakból, a  $\text{Ca}^{2+}$  a citoplazmába áramoljon. A kalciumnak a citoplazmába történő kilépése koncentráció-függő folyamat. Nyugalomban a citoplazmában a koncentráció mintegy 100 nmol/l, míg a kontrakció eléréséhez kb. 1  $\mu\text{mol/l}$  koncentrációra történő emelkedés szükséges. A citoplazmába kikerült  $\text{Ca}^{2+}$  diffúzióval eljut a  $\text{Ca}^{2+}$ -kötő helyekhez (lásd 1.7. fejezet), melynek következtében történik meg a harántcsíkolt izom kontrakciója. A citoplazmában a kalciumkoncentráció mindaddig emelkedett marad, míg a  $\text{Ca}^{2+}$  vissza nem kerül a szarkoplazmatikus retikulum területére (nincs ábrázolva). Amennyiben a  $\text{Ca}^{2+}$  visszavételét gátoljuk, relaxáció nem tud kialakulni. Ezt a tartós kontrakciós állapotot **kontraktúrának** hívjuk.



1-6. ábra: A triád szerkezete és a  $\text{Ca}^{2+}$ -ion felszabadulásának vázlatos rajza

### 1.7. A vázizom kontrakciójának molekuláris mechanizmusa

Mint ahogy korábban már említettük a vázizomrostok fénymikroszkóppal is jól megfigyelhető szerkezeti sajátossággal rendelkeznek. A vázizomrostok vékony filamentumainak szerkezeti felépítésében legfőképpen az **aktin** nevű fehérje vesz részt. Az aktin két formája ismert, az egyik a globuláris monomerként azonosított **G-aktin**, a másik a fibrilláris, több száz monomerből felépülő **F-aktin**. A vázizmok vékony filamentumait két egymás mellett elhelyezkedő, csavarodott F-aktinlánc alkotja.

A szabályozó fehérjék közül a **tropomiozin** két aminosavláncból álló vegyület, mely a két aktinlánc között helyezkedik el. A másik szabályozó fehérje a **troponin**, mely három alegységből áll. A **troponin-T** alegység alakítja ki a kapcsolatot a tropomiozin fehérjével. A **troponin-I** alegység, a nevéből is adódóan, szerepet játszik az aktin-miozin kölcsönhatás gátlásában. A harmadik alegység a **troponin-C**, mely elnevezését onnan kapta, hogy képes a  $\text{Ca}^{2+}$  megkötésére. Nyugalomban a tropomiozin-troponin rendszer gátolja az aktinon található miozinkötő helyeket, gátolva ezáltal a kölcsönhatást. Amikor a citoplazmatikus  $\text{Ca}^{2+}$  koncentráció a korábban említett módon megemelkedik, a troponin-C alegység kötőhelyei megkötik a  $\text{Ca}^{2+}$ -ot. A kötődés hatására a komplex

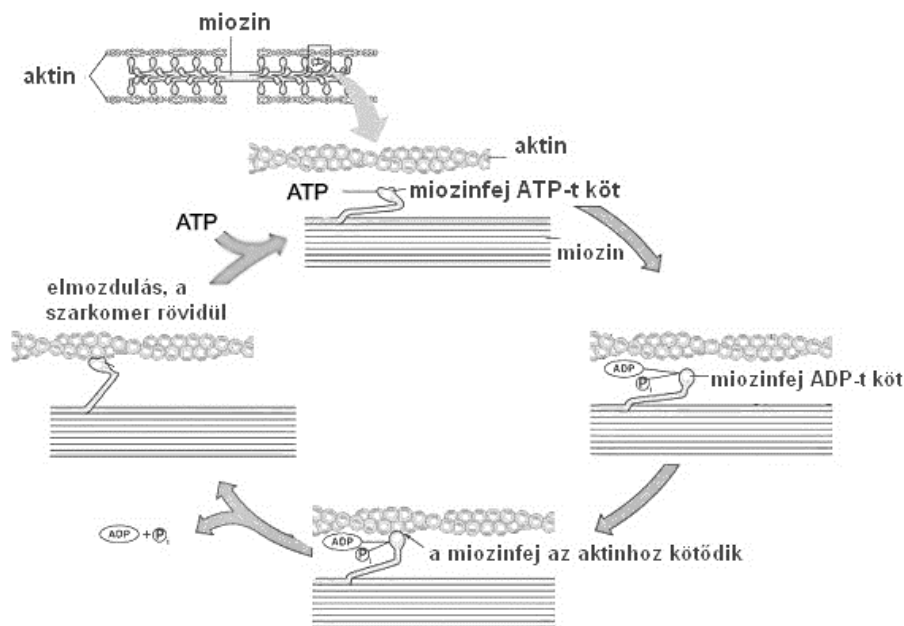


konformációváltozáson esik keresztül, melynek következtében szabaddá válik az aktin miozinkötő helyei a vastag filamentumok számára

Az összehúzódáshoz elengedhetetlen az **ATP** (energiaszállító nukleotid), ill. a korábban említett **Ca<sup>2+</sup>-ionok** jelenléte. A kölcsönhatás során a harántcsíkolt izom három állapota figyelhető meg, melyek ciklikus ismétlődése figyelhető meg (1-7. ábra):

- **nyugalmi állapot**, melynek során a miozinfajhoz ATP kötődik, az aktin és miozin nem kapcsolódik egymáshoz,
- **aktivált állapot**, amikor a miozinfajról az ATP disszociál (leválik) a miozinfaj az aktinhez kötődik (aktomiozin), megtörténik az elmozdulás (ha a miozinfajhoz újabb ATP kapcsolódik, a kötés megszűnik, a folyamat előről indul),
- **rigor állapot**, akkor alakul ki, ha a szervezetben nincs ATP, ilyenkor a miozinfaj nem képes leválni az aktinről, szoros kapcsolat alakul ki (ez az oka a hullamerevség = rigor mortis kialakulásának).

Az aktivált izomban az aktin és miozin között kialakult **kereszthidak** a vastag filamentummal mintegy 90°-os szöget zárnak be. Az ATP leválásával a kereszthidak kb. 45°-os szöghelyzetbe kerülnek, és közben magukkal húzzák a hozzájuk kapcsolódó vékony filamentumokat (**„csúszófilamentum mechanizmus – sliding mechanizmus”).** Mindez azt jelenti, hogy a szarkomert határoló Z-lemezek a szarkomer közepe felé mozdulnak el, változtatva ezzel a szarkomer hosszát. Az aktivált állapot vége és a következő szakasz, a rigor állapot közös jellemzője az átmeneti ATP hiány. Az újabb ATP-molekula kötődése megszünteti az aktomiozin kapcsolatot, és a kereszthidak visszatérhetnek a 90°-os szöghelyzetbe. Amennyiben az aktivált állapot fennáll, azaz a citoplazmatikus Ca<sup>2+</sup> szint magas, és a troponin-C alegységek továbbra is Ca<sup>2+</sup>-ot kötnek, úgy újra létrejöhét az aktin és miozinfaj kapcsolódása, a szarkomer rövidülése folytatódhat. Amennyiben időközben az aktiváció megszűnik, az izomrost elernyed, a kereszthidak felveszik a nyugalmi állapotra jellemző szerkezeti elrendezésüket.



1-7. ábra: A harántcsíkolt izom kontrakciója

## 1.8. Az izomműködés mechanikai jellemzői

### 1.8.1. Az izomkontrakció típusai

Egyetlen akciós potenciál során kialakuló mechanikai választ **izomrángás**nak nevezünk (1-8/a ábra). Az izomrángás időtartama függ az izom típusától. A gyors izomrostokban a kontrakció ideje kb. 7 ms, míg a lassú izomrostokban ez az érték elérheti akár a 100 ms-ot is.

Az izomkontrakció a kontraktilis elemek rövidülésével jár, azonban a kontraktilis elemekkel elasztikus és viszkózus elemek sorba vannak kapcsolva, így a kontrakció úgy is létrejöhét, hogy a teljes izom hossza csökkenne. Az olyan szélsőséges kontrakciót, amikor az izom hossza nem változik, csak a feszülés fokozódik, **izometriás kontrakciónak** nevezzük (pl nehéz tárgy felemelése). A másik szélsőséges esetben a megrövidülésnek nincs akadálya, a megrövidülés változatlan feszülés mellett következik be. Az ilyen kontrakciót, amikor az izom hossza változik, azonban a feszülés nem,

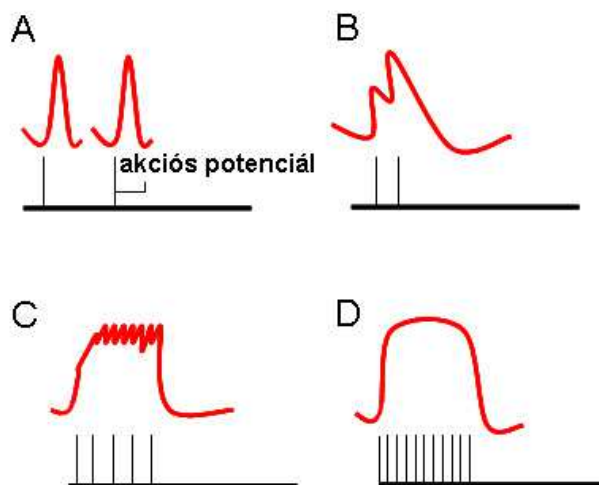
**izotóniás kontrakciónak** nevezzük. Ebben az esetben akkor, amikor az izom megrövidül **anizometriás koncentrikus kontrakciónak**, amikor az izom megnyúlik, **anizometriás excentrikus kontrakciónak** nevezzük. A hossz- és a feszülésváltozás az izmokban leggyakrabban egyidejűleg következik be. Az ilyen kontrakciót ahol az izom hossza és feszülése is változik, **auxotóniás kontrakciónak** nevezzük.

A megrövidülés sebessége annál nagyobb, minél kisebb erővel szemben kell, hogy végbemenjen. Az **izomerő és a megrövidülés sebessége** közötti összefüggést az ún. **Hill-egyenlet** írja le, ami:

$$(F + a) * (V + b) = (F_0 + a) * b = \text{konstans},$$

Ahol **F** az izomerőt jelenti, **V** a megrövidülés sebességét, **F<sub>0</sub>** az izom maximális izometriás erejét, **a** és **b** az adott izomra jellemző értékek. Mindebből az következik, hogy a feszülés és a megrövidülési sebesség fordítottan arányos, azaz a leggyorsabb hosszváltozás akkor következhet be, ha az izom terhelés nélkül kontrahál, míg a legnagyobb feszülés pedig izometriásan váltható ki. A különböző mozgásokat a sportban ún. dinamikus és statikus gyakorlatokra osztjuk aszerint, hogy az említett izommozgás milyen elemeket (rövidülésszerű, nyújtásos, izometrikus) tartalmaz.

A vázizomzat esetén nem fordul elő, hogy egyetlen egy akciós potenciál érje az izomrostot, a motoros idegsejteken mindig ingerek sorozata jut el az izomzathoz. Amennyiben az ingerlési frekvencia nő, akkor az izomfeszülés minden egyes rángás után fokozódik, az első kontrakcióra újabb rakódik (1-8/B ábra). Ezt a jelenséget **szuperpozíciónak** nevezzük. Ennek a lépcsős változásnak az oka az, hogy a  $\text{Ca}^{2+}$  mennyisége minden egyes ingereknél az előző aktiválásból maradt citoplazmatikus  $\text{Ca}^{2+}$  koncentrációhoz adódik, befolyásolva ezzel az aktin-miozin kölcsönhatást. Tovább növelve az ingerlési frekvenciát (15-30/s), az egyes kontrakciók egyre inkább egymásra rakódnak, és a szummálódott ingerek között csak részleges relaxáció tapasztalható, ilyenkor **inkomplett tetanuszról** (1-8/C ábra) beszélünk. Amikor a sorozatingerlés frekvenciája 30-60/s-ot ér el, az egyes rángások már nem lesznek elkülöníthetőek, elernyedés nélküli, **komplett tetanusz** (1-8/D ábra) jön létre.

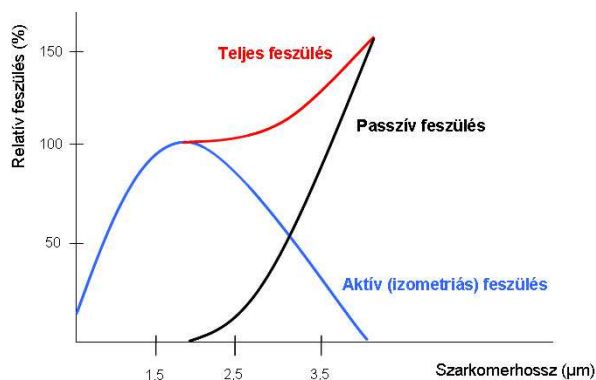


1-8. ábra: A vázizom-kontrakciók formái

A: rángás, B: szuperpozíció, C: inkomplett tetanusz, D: komplett tetanusz

### 1.8.2. Az izomhossz és az izomfeszülés közötti összefüggés

Az izomrost maximális ereje, azaz feszülése az izometriásan kiváltódott komplett tetanusszal jellemezhető. Ha úgy alakítjuk ki a tetanuszos összehúzódásokat, hogy közben változtatjuk az izomrost hosszát, jellegzetes összefüggést kaphatunk (1-9. ábra). A legnagyobb kontrakció kiváltása akkor lehetséges, amikor a rost hossza kb.  $2\text{ }\mu\text{m}$ -es szarkomerhossznak (**optimális szarkomerhossz**) felel meg. Amennyiben a szarkomerhossz ennél nagyobb, vagy kisebb, úgy a kontrakciós erő mindkét esetben csökken. A változás oka az, hogy a rostok nyújtásakor a keresztidák száma változik, ami befolyásolja a generálható erő nagyságát. Igen nagyfokú nyújtás (kb.  $4\text{ }\mu\text{m}$ ) mellett az átfedés teljesen megszűnik, így ebben az esetben mechanikai válasz nem hozható létre.



1-9. ábra: A vázizomrost hosszának és feszülésének összefüggése

## 1.9. Energiaforrások az izomműködés során

Ismert tény, hogy az izomkontrakció energiaigényes folyamat, melynek során az izom a kémia energiát mechanikai energiává alakítja. Az izomműködés közvetlen energiaforrása az energiagazdag szerves foszfátvegyületek képezik, melyek anaerob módon állnak rendelkezésre. A vázizom a kémiai energia kb. 40-50%-át tudja mechanikai energiává alakítani, a többi hőtermelés formájában valósul meg. Az így felszabadult hő jelentősen hozzájárul a szervezet hőszabályozásához. Az aerob és anaerob folyamatok arányai fontosak és egyik sem kizárólagos, hiszen ismert, hogy még álmunkban is termelünk tejsavat, ami az életfolyamathoz szükséges.

### 1.9.1. Anaerob energiaképzés

Az izomműködés közvetlen energiaforrása az **adenozin-trifoszfát (ATP)**, mely nyugalmi körülmények között csak mmol/l-es koncentrációban található a citoplazmában, így csak időlegesen tudja fedezni a kontrakcióhoz szükséges energiát. A raktározott ATP, mindösszesen néhány mp-ig képes fedezni az energiaszükségletet, azonban az ATP folyamatos reszintézise fenntartja a szükséges energiaellátást. A reszintézis forrásaként említendő a **kreatin-foszfát (kreatin-P)**, ugyancsak néhány mmol/l). A kreatin-foszfát nem közvetlenül felhasználható energiaforrás, azonban egy enzim, a **kreatin-foszfokináz** képes a  $\text{kreatin-P} + \text{ADP (adenozin-difoszfát)} \leftrightarrow \text{kreatin} + \text{ATP}$  reakció alatt az időközben kimerült ATP tartalék pótlására. A kreatin-foszfát kb. 5-6 másodpercnyi energiabiztosítást jelent, így a foszfátvegyületek mindösszesen 7-10 mp munka energiaigényét képesek fedezni **anaerob alaktacid** módon. Nagy intenzitású sprintteljesítménynél (100 m-es síkfutás) előfordul, hogy a teljes munkát anaerob módon végezzük. Néhány másodperces munkavégzés után a foszfátraktárak teljesen kiürülnek. Az ennél hosszabb munkavégzésnél kerül sor a szénhidrátok, jelen esetben a glikogén anaerob módon történő felhasználására (**anaerob laktacid**). A folyamat első lépése a **glikogenolízis**, mely folyamatban a glikogén glükózzá alakul. Ezután a glükóz a citoplazmában, a **glikolízis** alatt több lépcsőn keresztül, enzimek segítségével, három

szénatomos **piroszölősav**vá alakul. Amennyiben az oxigénellátás nem kielégítő, a keletkezett piroszölősav nem lép be a mitokondriumba és tejsavvá ( $C_3H_6O_3$ ) redukálódik. A keletkezett **tejsavat**, illetve annak nátriummal vagy káliummal létrejött sóját (laktát) a vérkeringés a májhoz juttatja, ahol a glikogén reszintézise újra megtörténik. Ezt a folyamatot **Cori-körnek** hívjuk. Ilyen módon egy molekula glükóz bontásából 2 ATP molekula képződik, mely jelentősen elmarad az aerob módon történő energianyeréstől.

### 1.9.2. Aerob energiaképzés

Az aerob energianyerés forrásai a szénhidrátok, a zsírok, és a fehérjék lehetnek. A szénhidrátok a már korábban említett módon **piroszölősav**vá alakulnak. A keletkezett vegyület oxigén jelenlétében **acetilcsoport**tá alakul, **koenzim-A** (KoA) molekulához kapcsolódik (AcKoA), és a mitokondriumba szállítódik. A két szénatomos acetilcsoport a citrátciklusba (Szentgyörgyi-Krebs ciklus) belépve az **oxálecetsav** vegyülethez kapcsolódik. A körfolyamat végtermékeként szén-dioxid (ezt lélegezzük ki) és **nikotinamid-adenin-dinukleotid** (NADH) keletkezik. A NADH hidrogénionjából ( $H^+$ ) a terminális oxidáció ciklus alatt az oxigénhez kapcsolódva víz keletkezik. Mindebből adódik, hogy egy molekula glükóz égése során további 36 mol ATP képződik, így összesen, a glikolízist beleértve 38 mol, melynek egyenlete a következő:



A szervezet a legnagyobb energiaraktárát a **zsírok** biztosítják. A zsírok kizárólagosan csak aerob módon tudnak energiát szolgáltatni, anaerob módon a zsírokból nem lehet energiát nyerni az izomműködéshez. A zsírok nagy része, három szénatomos, úgynevezett **trigliceridek** formájában raktározódnak a szervezetben. A  **$\beta$ -oxidáció** folyamatában a trigliceridekből 2 szénatomos egységek, **acetyl csoportok** keletkeznek. Ezek a csoportok a KoA molekulához kapcsolódnak, aminek segítségével a mitokondriumhoz jutnak, majd a citrátciklusba lépnek. Mint ahogy korábban említettük, a mitokondriumban lezajló citrátciklus megfelelő oxigénellátottság mellett képes ellátni a feladatát, így ezek a folyamatok csak aerob körülmények között képesek végbemenni. Energetikai szempontból a zsírok bontása a szénhidrátokból származó energia többszörösét jelenti, ugyanis amennyiben egy trigliceridhez 3 db 18 szénatomos zsírsav

(sztearinsav) kapcsolódik, abban az esetben a triglicerid lebontásából mintegy 330 mol ATP keletkezik. Mivel a zsírraktáraink gyorsan pótlódni képesek, így a szervezet energiahánya csak rendkívüli esetben áll fenn, mint néhány extrém aerobkapacitást igénylő sportágaknál, mint pl. országúti kerékpárosoknál, maratoni futóknál. Mindezek miatt a szénhidrátszintjüket ezeknél a sportolóknál folyamatosan szinten kell tartani a fizikai aktivitás során.

A **fehérjék** a zsírokkal megegyezően kizárólagosan csak aerob módon képesek bomlani. Egészségesen táplált szervezetben a fehérjék bontására nem kerül sor, mert először a szénhidrátok és zsírtartalékainkat használjuk fel. A fehérjék **aminosavakból** épülnek fel. A bontásukkor először az aminocsoport lehasítása történik meg (deaminálás), majd a szervezet a maradék szénláncot hasznosítja. A lehasított aminocsoportok **karbamidként** (urea) a vizelettel távoznak a szervezetből.

### 1.10. Hőtermelés az izomban

Az izomműködés során a kémiai energia egy része **hőenergiává** alakul. A keletkezett hőenergiának különböző részeit lehet megkülönböztetni. A **nyugalmi hő**, nyugalomban lévő izmon mérhető, mely az alapanyagcsere-folyamatok során keletkezik. A **kezdeti hő** a kontrakció alatt termelt hőmennyiség, mely az **aktiválási hőből**, illetve a **megrövidülési hőből** tevődik össze. Az aktiválási hő az izom kontrakciójakor szabadul fel, a megrövidülési hő nagysága arányos az izomrövidülés hosszával. A kezdeti hő aerob és anaerob körülmények esetén egyaránt megfigyelhető, ami elsősorban a kreatin-foszfát bontásával magyarázható. A kontrakciót követően a hőtermelés akár 30 percig is folytatódhat, amit **regenerációs hőnek** is nevezünk. A regenerációs hő nagysága nagyjából megegyezik a kezdeti hővel, azaz a regeneráció alatti hőtermelés megegyezik a kontrakció alatt termelt mennyiséggel.

A harántcsíkt izom hőtermelési folyamata esszenciálisnak mondható, hiszen az izomműködés az egyetlen olyan folyamat, amivel a szervezet jelentősen növelni tudja a hőtermelését. Minden esetben izommunkát kell végeznünk, ha a szervezetet kihűlés veszélyezteti.

### 1.11. A vázizomrostok típusai

Az emberi harántcsíkolt izmok rostösszetétele kevert. Körülbelül 200 éve ismert, hogy vannak sötét, illetve világos rostok. A tudomány fejlődése révén a harántcsíkolt izmok felosztása megváltozott (1-1. táblázat) melyek a következők lehetnek:

Azok a rostok, melyek lassú, tónusos összehúzódásra képesek, nem fáradékonyak, és kitartó munkát képesek végezni **ST (slow twitch), I. típusú**, vagy más néven **lassú oxidatív** (*slow oxidatív, SO*) rostoknak nevezzük. Főbb jellemzőik, hogy sok mioglobint sok mitochondriumot tartalmaznak, gazdag a kapilláris hálózatuk. Színük alapján **vörös rostoknak** is nevezzük. Nagy számban találhatók a testtartást biztosító nyak- és törzsizomzatban.

Az izomrostok másik típusát azok a rostok (**FT, fast twitch**), **II. típusú** alkotják, melyek gyors, fázisos, robbanékony, azonban hamar fáradó összehúzódásra képesek. Ebben a csoportban két alcsoportot lehet elkülöníteni: (i) az ún. **II.B típusú** rostokat, melyek gyors glikolízissel (*FG, fast glycolitic: gyors glikolitikus*) energiát nyerő rostok, alacsony mioglobin tartalmúak, kevés mitochondriumot, kevés kapillárist és sok glikogént tartalmaznak. Színük **fehér**, ATP-t anaerob úton állítanak elő, nem tudják folyamatosan ellátni az izmot elegendő ATP-vel, könnyen kifáradnak, az ATP-t gyorsan bontják és gyors kontrakciós sebességűek, azonban nagyon fáradékonyak. A másik alcsoportba (ii) az ún. **II.A típusú rostokat** soroljuk, melyek oxidatív és glikolitikus energiaforrással is működő (*fast oxidative glycolitic: gyors, oxidatív glikolitikus, FOG*), sok mioglobint tartalmaznak, sok bennük a mitochondrium és gazdag a kapilláris hálózat. Színük **'piros'**, magas kapacitással szintetizálnak oxidatív úton ATP-t, az ATP-t gyorsan bontják, közepes erőfejlesztésre képesek, és közepes gyorsasággal fáradnak.

	<b>I. típusú izomrost (SO)</b>	<b>II.A típusú izomrost (FOG)</b>	<b>II.B típusú izomrost (FG)</b>
<b>Szín</b>	vörös	'piros'	fehér
<b>Mitochondrium</b>	nagyon sok	sok	kevés
<b>Rostátmérő</b>	vékony	közepes	vastag
<b>Z lemez</b>	vastag	közepes	vékony
<b>Kapillárisok</b>	nagyon sok	sok	kevés
<b>Glikolitikus aktivitás</b>	kevés	közepes	nagy
<b>ATP-áz aktivitás</b>	kevés	közepes	nagy
<b>Mioglobintartalom</b>	sok	közepes	kevés

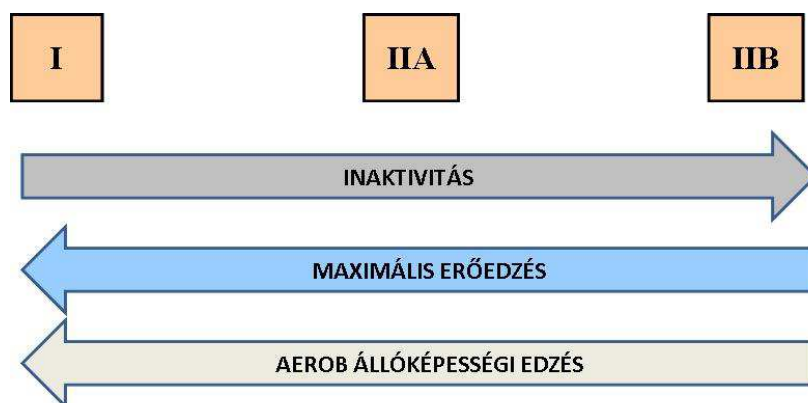


<b>Kontrakció sebessége</b>	lassú	gyors	gyors
<b>Fáradékonyság</b>	lassan fárad	közepese fárad	gyorsan fárad

1-1. táblázat: Izomrosttípusok és legfontosabb jellemzőik

Az edzéstípus helyes megválasztásával az izomrostok képesek tanulni, módosulni. A IIa rostok pl. aerob edzés hatására megtanulhatnak oxigént felhasználni, így részben át tudják vállalni a lassú rostok aerob munkavégzését. Ismert, hogy a sprintereknél az II.B rostok az edzések utáni pihenő időszakban felszaporodnak a combizomzatban. Állóképességi edzés esetén a II.B rostok II.A típusúvá, a II.A pedig I. típusú rostokká alakulnak, erőedzés hatására a II.B rostok II.A típusúak lesznek. Nagy intenzitású erőedzés és rövid intervallumú gyors munkavégzés kombinációjával az I. rostok II.A típusúvá válása érhető el (1-10. ábra).

A rostösszetétel meghatározására izombiopszia után elvégzett hisztokémiai vizsgálatok adhatnak választ. Az invazív (véres, szöveti károsodással járó) módon nyert szövetmintát lefagyasztják, majd vékony metszeteket készítve, és megfestve mikroszkóp alatt tanulmányozzák. Az izombiopszia segítségével megállapítható, hogyan változik az izomrostok összetétele gyors fizikai terhelés, vagy különböző edzésformák hatására.



1-10. ábra: Különböző rostátalakulási tendenciák eltérő edzéstípusok következtében.

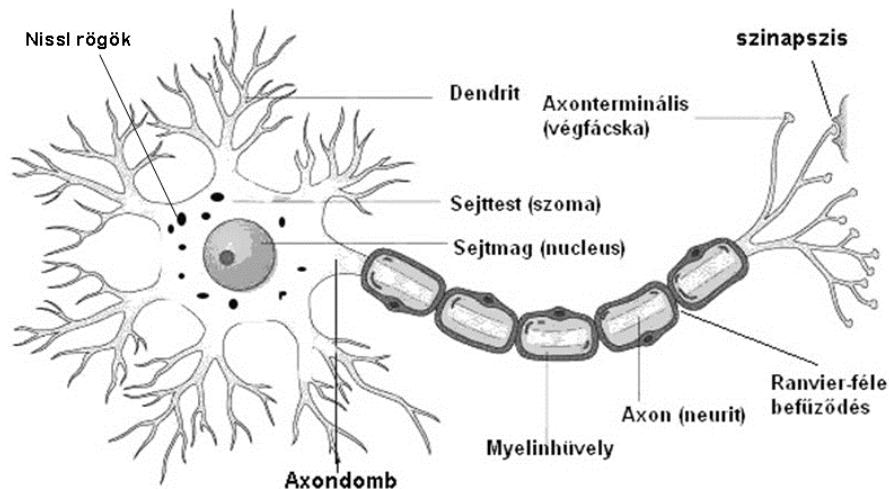
I: I típusú rost, IIA: II/A típusú rost, IIB: II/B típusú rost.

## 2. Az idegrendszer működésének alapjai

Az idegrendszer idegszövetből épül fel, melynek legfontosabb építőelemei az idegsejtek.

### 2.1 Az idegsejt (neuron) felépítése

A **neuron**ok feladata a szervezeten belüli „üzenetközvetítés”. A neuron az információkat általában kémiai jelként, ingerület átvivő anyag (**neurotranszmitter**) felszabadításával adja tovább. A neuronok részei (2-1. ábra): **sejttest** (*perikarion* vagy *soma*), melyben **sejtmag** (*nucleus*), ill. különböző sejtalkotók (pl.: Nissl szemcsék) figyelhetők meg.



2-1. ábra: Az idegsejt (neuron) általános szerkezete

Több sejttest elkülönülve ún. **magokat** (nucleus) alkot a központi-, míg **dúcokat** (ganglion) a környéki idegrendszerben. A sejttestekből egyrészt gyökérszerű rövid nyúlványok, **dendritek** ágaznak ki, másrészt egy hosszú nyúlvány az **axon** (*neurit*). Az axon kilépési helye kúpszerű, melyet **axondomb**nak nevezünk. Több axon együttesen alkotja a központi idegrendszerben az ún. **pályákat**, míg a környéki idegrendszerben az **idegeket**. A központi idegrendszerben a pályák hozzák létre az ún. **fehérállományt**, a sejttestek összessége a **szürkeállományt**. Az axon vége az **axonterminális** (végfácska),

*telodendrion*), ami kapcsolatot, **szinapszist** alakíthat ki más idegi, vagy nem idegi eredetű sejtekkel.

A neuronokat alakjuk és működésük alapján csoportosíthatjuk.

#### **Alak szerint lehetnek:**

- **nyúlvány nélküli** (apoláris) idegsejtek, pl.: neuroblasztok,
- **egynyúlványú** (unipoláris) idegsejtek, pl.: béli idegrendszer egyes idegsejtje,
- **álegynyúlványú** (pszeudounipoláris) idegsejtek, pl.: érzőidegek, melyek sejttestjei a csigolyaközi dúcban (*ganglion spinale*) találhatók (lásd 3-3. ábra, illetve 3-4. ábra)
- **kétnyúlványú** (bipoláris) idegsejtek, pl. a VIII. agyideg mindkét dúcában, vagy a retinában
- **soknyúlványú** (multipoláris) idegsejtek, pl.: nagyagyú piramis sejtje.

#### **Működési felosztásuk szerint az idegsejtek:**

- **érző** (szenzoros-),
- **összekötő** (inter-),
- **mozgató** (effektorikus-) neuronok lehetnek.

Az idegszövet felépítésében a neuronokon kívül, a **gliasejtek** vesznek részt, melyek többek között táplálják, védik a neuronokat, illtvt részt vesznek a **myelinhüvely** szintézisében. Az axont és az azt körülvevő velőshüvelyt **idegrostnak** nevezzük. Mind a központi, mind a perifériás idegrendszerben az axonok körül gliasejtek alakítanak ki hüvelyt. Ezek a gliasejtek a központi idegrendszerben az **oligodendrogliasejtek**, a perifériás idegrendszerben pedig a **Schwann-sejtek**.

#### **Az axonok hüvely szerinti csoportosítása:**

- **Schwann-myelinhüvelyes** rostok, pl.: perifériás idegrostok nagy része
- **myelinhüvelyes** rostok, pl.: a központi idegrendszer fehérállományában található idegrostok
- **csupasz idegrostok**, melyekben az axonok közvetlenül érintkeznek a sejten kívüli térrel, pl.: fájdalomérző axonok

\*Kiegészítés: A sclerosis multiplex (SM vagy MS) a központi idegrendszer autoimmun, gyulladásos megbetegedése. Az SM betegségben a nem megfelelően működő immunrendszer, az idegsejtek axonjait burkoló velőshüvelyt támadja meg, feloldva, elroncsolva azt. Ennek következtében az idegsejt lassabban vezeti, vagy teljesen blokkolja az ingerületet. A betegség a központi idegrendszer összes pályarendszerét érinti. A plakkok okozta károsodások miatt a tünetek a következők lehetnek: homályos és kettős látás, rosszul érthető beszéd, nyelészavar, végtaggyengeség, illetve mozgatási nehézség, egyensúlyzavar, ülés, állás vagy járás közben a test felületén érzett zsibbadás, végtagbénulás, végtagok (kéz) remegése.

## 2.2. Az ioncsatornák

Az idegsejtek transzmembrán folyamatok közreműködésével tartják fent a kapcsolatot a sejten belüli (intracelluláris), ill. a sejten kívüli (extracelluláris) tér között. Ezeket a szabályozott membránon keresztül zajló folyamatokat **ioncsatornák** teszik lehetővé.

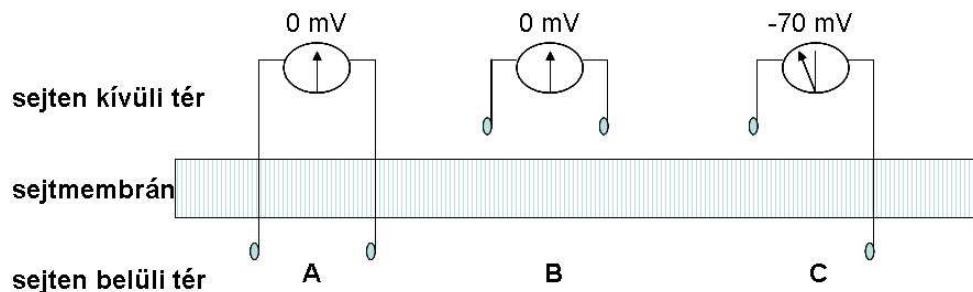
Működésük alapján az alábbi ioncsatornákat tudjuk megkülönböztetni:

- **transzmitterfüggő ioncsatorna**, mely csak egy rá jellemző transzmitter kapcsolódásakor nyílik, pl.: nikotin-típusú acetilkolin receptor (nAChR),
- **feszültségfüggő ioncsatorna**, mely a membrán polaritásának megváltozására nyílik, pl.: feszültségfüggő  $\text{Na}^+$ -csatorna,
- **energiát igénylő ioncsatorna**, mely ATP molekula hasításakor nyílik, pl.:  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -pumpa,
- **mechanikus ioncsatorna**, a membrán feszülésének hatására nyílik, majd a feszülés megszűnésekor a csatorna bezárul, pl.: hallójárat szőrsejtjeiben.

## 2.3. A nyugalmi membránpotenciál kialakulása

Állatkísérletek bizonyították, hogy ha a nyugalomban levő idegroston kívüli térbe (2-2/B. ábra) helyeztek két elektródát, és azokat megfelelő erősítőn keresztül összekötötték, nem találtak feszültséget (potenciálkülönbség). Ha az ingerlő elektródákat a sejt belsejébe (2-2/A. ábra) juttatták, abban az esetben sem jelentkezett potenciálkülönbség. Az egyik elektród beszúrása után (2-2/C. ábra) azonban egy

állandóan mérhető potenciálkülönbség volt tapasztalható a membrán külső és belső felszíne között, melyet **nyugalmi membránpotenciálnak** nevezünk.



2-2. ábra: A sejtmembrán két oldala között mérhető potenciálkülönbség

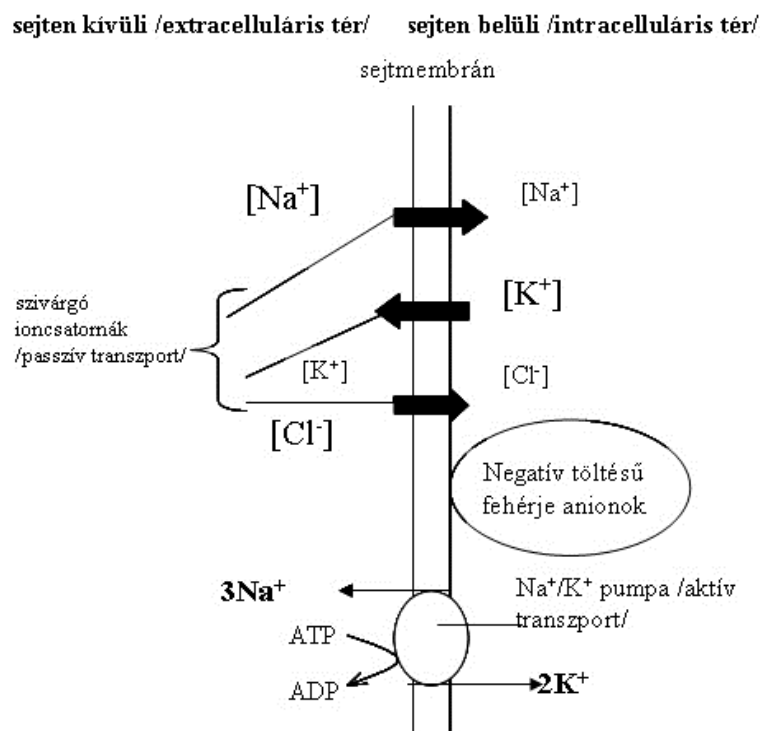
**A:** Mindkét elektród a sejt belsejében, nincs potenciálkülönbség, **B:** A: Mindkét elektród a sejt kívüli térben, nincs potenciálkülönbség, **C:** Egy elektród a sejt belsejében, egy elektród a sejt kívüli térben, -70mV-os potenciálkülönbség,

A sejtmembrán két oldalán különböző ioneloszlás tapasztalható. Ez a membrán különböző mértékű ionáteresztő képességének (permeabilitás) köszönhető. A sejt kívüli (extracelluláris) térben a  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , illetve a  $\text{Cl}^-$ -ionok, míg a sejt belüli (intracelluláris) térben a  $\text{K}^+$ -ion, és a fehérje-anionok - melyek a sejt belsejének negatívabb töltést biztosítanak - találhatók nagyobb koncentrációban. Az ionok a koncentráció gradiensüknek megfelelően, azaz a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb koncentrációjú hely felé, az ún. **szivárgó ioncsatornákon** keresztül vándorolnak a membránon át. A folyamat energia-befektetést nem igénylő, passzív transzport. Egy idő után a szivárgó csatornán keresztül történő ionvándorlás eltérő ionkoncentrációt hozna létre. A sejt állandó állapotának fenntartásában elsősorban a  **$\text{Na}^+/\text{K}^+$ -pumpa** segít. A pumpa 3  $\text{Na}^+$ -iont pumpál a sejt belsejéből a sejt kívüli térbe, míg 2  $\text{K}^+$ -iont hoz be a sejt kívüli térből a sejt belsejébe. Ez a működés az ionok koncentráció gradiensük ellenében történik, így a pumpa csak energia befektetés mellett képes ellátni feladatát. Az ehhez szükséges energia ATP bontásából származik. A folyamat aktív transzport

A membránnal elválasztott terek elektromos semlegességének fenntartásához negatív töltésű ionok is kellenek. A sejt belüli térben negatív töltésű fehérjék

találhatók. Mivel ezeknek a fehérjéknek a mérete viszonylag nagy (ún. óriásmolekulák), így nem képesek a sejtmembránon át történő vándorlásra. A  $\text{Cl}^-$ -ion kismértékű diffúziójának, ill. kicsi koncentrációkülönbségének köszönhetően nem befolyásolja jelentősen az ioneqyensúlyt a membrán két oldala között.

A két pozitív ion ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) eltérő eloszlásának következtében, a külső membránfelszín pozitívabb lesz a belső felszínhez képest. Így a membrán két oldala között potenciálkülönbség, nyugalmi membránpotenciál mérhető, melynek értéke sejtípustól függően  $-50$ - $-90\text{mV}$  (2-3. ábra).



2-3. ábra: A nyugalmi membránpotenciál kialakulásának vázlata

A sejtmembrán nyugalmi potenciálját a **Goldman-Hodgkin-Katz** egyenlet (GHK-egyenlet, 2-4. ábra) adja meg.

$$V_m = \frac{RT}{zF} \ln \frac{P_K[K^+]_o + P_{Na}[Na^+]_o + P_{Cl}[Cl^-]_i}{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_o}$$

#### 2-4. ábra: A GHK egyenlet

Ahol,  $V_m$ , a nyugalmi membránpotenciál (elektromotoros erő),  $R$ , az egyetemes gázállandó,  $T$ , az abszolút hőmérséklet,  $z$ , a töltésszám,  $F$ , a Faraday-féle állandó,  $P$ , az egyes ionok membrán permeabilitása, „o” index, az ionok külső, „i” index, az ionok belső koncentrációi,  $\ln$  pedig a természetes alapú logaritmus.

Az egyenlet kimondja, hogy ha egy ionfajta koncentrációja, vagy az adott ionra nézve a membrán permeabilitása növekszik, akkor nő a szerepe a membránpotenciál kialakításában is. A GHK-egyenlet nemcsak nyugalomban, hanem az idegsejtek, ideg- és izomrostok minden pillanatnyi állapotában alkalmazható.

#### 2.4. Az akciós potenciál kialakulása

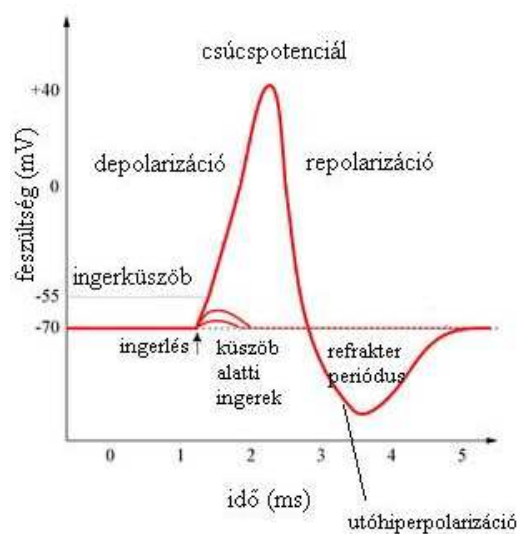
Ha inger éri az idegsejtet, akkor a sejt membránjának permeabilitása több százszorosára fokozódik, a  $\text{Na}^+$ -ionok a nagyobb koncentráció irányába, azaz a sejt belseje felé kezdenek vándorolni. A  $\text{Na}^+$ -ionok sejtbe történő áramlásának következtében változik a töltéseloszlás a membrán két oldalán, a membrán **depolarizálódik**. Amikor a membránpotenciál elér egy kritikus értéket, nyílnak a feszültségfüggő  $\text{Na}^+$ -csatornák, kialakul az ún. **akciós potenciál (AP, 2-5. ábra)**. Azt a kritikus feszültségértéket, mely kiváltja az AP bekövetkezését, **ingerküszöbnek** nevezzük. Amennyiben a depolarizáció elérte a fent említett küszöbértéket, az AP mindenképp bekövetkezik, amit az AP **„minden vagy semmi” törvényének** nevezünk. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a sejtre érkező inger nem éri el az ingerküszöböt, akkor nem alakul ki AP („semmi” állapot), ha azonban a depolarizáció mértéke eléri, akkor mindig ugyanakkora potenciálváltozás mérhető az adott sejt membránján („minden állapot”). A sejten kívüli térben elhelyezkedő  $\text{Na}^+$ -ionok a sejtbe történő beáramlása átpolarizálja a membránt. Amikor a legnagyobb pozitív potenciál mérhető a sejtmembránon, akkor **csúcspotenciálról** (tüske, „spike”) beszélünk, melynek értéke körülbelül +30-40 mV. Egy idő után a fokozott  $\text{Na}^+$ -permeabilitás lecsökken, a csatorna inaktiválódik, mellyel párhuzamosan az axon membránja a  $\text{K}^+$ -ionokra lesz permeabilis.

\*Kiegészítés: 1.) Néhány állati eredetű toxin, pl. skorpió toxinja állandóan nyitva tudja tartani a  $\text{Na}^+$ -csatornákat. 2.) A rovarkártevők ellen bevezetett DDT (diklór-difenil-

triklóretán) ezeket a feszültségfüggő  $\text{Na}^+$ -csatornákat stimulálja. Mérgezése esetén remegés, mozgáskoordinációs zavar, ill. görcsös állapot észlelhető. A DDT lassú lebomlása miatt napjainkban is jelentősen terheli a bioszférát.

A csúcspotenciál elérése után a  $\text{K}^+$ -ionok a koncentráció-grádiens irányába, azaz a sejt belsejéből, a sejten kívüli tér felé kezdenek áramlani feszültségfüggő  $\text{K}^+$ -csatornákon keresztül. Mivel pozitív ionok áramlanak ki a sejtől, a membránpotenciál negatív irányba tolódik, melyet **repolarizációnak** nevezünk. A  $\text{K}^+$ -ionok kiáramlásával a  $\text{Cl}^-$ -ionok beáramlása tart egyensúlyt. A  $\text{K}^+$  sejtől történő kiáramlása, ill. a  $\text{Cl}^-$ -ionok sejtbe történő beáramlása miatt, a potenciálkülönbség értéke a nyugalmi potenciál értékénél is alább száll, melyet **utóhiperpolarizációnak** nevezünk.

A fenti folyamatok eredményeképpen a töltéseloszlás, így a membránpotenciál visszaáll az eredeti értékre, de az ioneloszlás még különbözik a kiindulási, nyugalmi helyzettől. Ebben az állapotban, a sejt belsejébe  $\text{Na}^+$ -ionokat, a sejten kívül  $\text{K}^+$ -ionokat találunk a kiindulási értéknél nagyobb koncentrációban. Az eredeti ioneloszlás visszaállítását a  **$\text{Na}^+/\text{K}^+$ -pumpa** végzi. A pompa ATP bontásából származó energia felhasználásával 3  $\text{Na}^+$ -iont juttat a sejt belsejéből a sejten kívüli térbe, míg ezzel párhuzamosan 2  $\text{K}^+$ -iont juttat a sejtbe. A pompa működése energiafelhasználás szempontjából aktív transzport. Újabb AP kialakulásához idő szükséges (**refrakter periódus**), mert az ionpumpának helyre kell állítania az eredeti ioneloszlást. Az AP folyamata rendkívül gyorsan, körülbelül 3-4 ms alatt zajlik le.



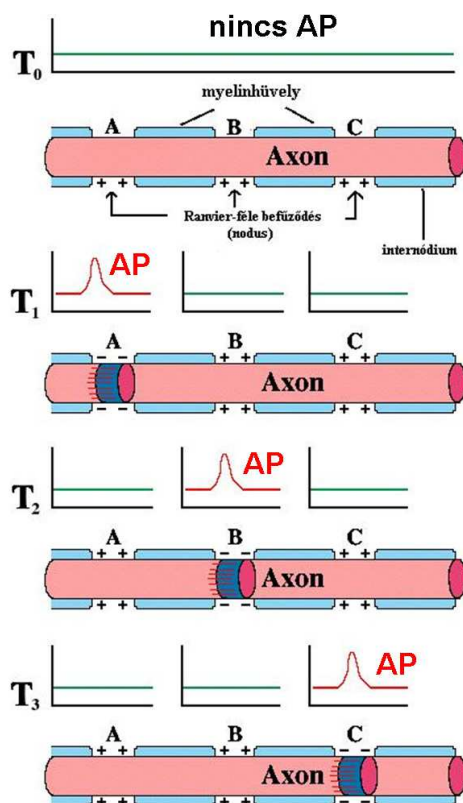


## 2.5. Az akciós potenciál terjedése

Az ingerületek keletkezése mellett az idegsejtek elemi működéséhez tartozik az ingerület vezetése is. A tovaterjedés általában a sejttest felől, az axoneredési dombról (2-1. ábra) indul, s az axon-végződés felé halad. A tovaterjedés sebessége meghatározza az ingerületvezetés sebességét. Az ingerületterjedés a következőképpen valósulhat meg:

- **pontról–pontra** (csupasz, velőhüvely nélküli membránszakaszokon),
- **befűződésről-befűződésre** („szaltatórikusan” ugrálva, velőhüvellyel borított membránszakaszokon).

A **pontról pontra** terjedés viszonylag lassú folyamat (lásd. 2-1. táblázat, C-rostok). Az egymást követő membránrészleteken kiváltott elektromos impulzusok hullámszerűen terjednek a neuronon. Az ingerületterjedés sebességét egyrészt az axon átmérőjének növelése befolyásolja. Minél nagyobb a rost belső átmérője - kisebb az ellenállása -, annál nagyobb a rost vezetési sebessége. Mivel az axon átmérője csak bizonyos határig növelhető, így hatékonyabb módszer a vezetési sebesség fokozására, az ún. **szaltatórikus** vezetés (2-6. ábra). Megvalósulását a myelinhüvely kialakulása teszi lehetővé. A velőhüvelyes rostok fejlődése során a Schwann-sejtek többszörösen az axon köré csavarodva „szigetelik” azt. Az így kialakult velőhüvely néhány mm-en keresztül folyamatosan burkolja az axont. A szigetelések között bizonyos szakaszokon (körülbelül 0,5-1µm) az axon csupasz marad, melyet **Ranvier-féle befűződéseknek** (csomó, nodus) nevezünk. Ezeknél a befűződéseknel az axon membránja közvetlenül érintkezik a sejten kívüli térrel, és mivel csak itt találhatók feszültségfüggő  $\text{Na}^+$ -csatornák, ezért kizárólag ezeken a helyeken tud AP kialakulni. Két Ranvier-féle befűződés között helyezkedik el az **internodium**. A velőhüvelyes idegrostokban az ingerületvezetés nagyon gyors is lehet, elérheti a 100-120m/s nagyságrendet is (lásd. 2-1. táblázat)



2-6. ábra: A szaltatórikus vezetés vázlata

Az idegrost vastagsága és vezetési sebessége alapján elkülöníthetünk (Erlanger-Gasser nyomán, 1944 Nobel-díj):

- vastag, myelinhüvelyes **A-rostokat**
- vékony, myelinhüvelyes **B-rostokat**
- még vékonyabb, myelinhüvely nélküli **C-rostokat**

ROSTTÍPUSOK		ÁTLAGOS ÁTMÉRŐ ( $\mu\text{m}$ )	VEZETÉSI SEBESSÉG (m/s)
velőhüvelyes	A $\alpha$	15	70-120
	A $\beta$	8	30-70

	A $\chi$	5	15-30
	A $\delta$	3 alatt	12-30
	B	3	3
velőtlen rostok C		1 alatt	0,5-2

2-1. táblázat: Az idegrostok Erlanger-Gasser-szerinti csoportosítása

## 2.6. Az akciós potenciál átadása

### 2.6.1. Idegvégződés

Az idegsejtek axondombján keletkezett ingerület egyirányúan a sejttest felől az axonterminális (végfáciska) felé vezetődik. A neuronok végrészei az idegvégződés, melyek a felvevő, végrehajtó, ill. maguk a neuronok között létesítenek kapcsolatot. Ezek alapján **terminális** és **interneuronális** (neuronok közötti) idegvégződéseket tudunk megkülönböztetni. A terminális idegvégződéseket a különböző szöveti elhelyezkedésük alapján csoportosíthatjuk. Ennek megfelelően hám-, kötő- és izomszövetben előforduló idegvégződésekről beszélhetünk. Az interneuronális idegvégződések, mint a neve is mutatja, magában az idegszövetben találhatók. Ha az idegrostok idegvégződései a végződés helyén az adott szövetben semmiféle változást nem idéznek elő, akkor szabad idegvégződésről, ha az általuk módosított sejtekkel együtt alaktani egységet hoznak létre, akkor idegvégtestről beszélünk.

#### A/ A hámszövet idegvégződései:

- **szabad idegvégződések**, melyek valószínű, hogy a fájdalomérzékelés receptorai,
- **idegvégtestek**, a Merkel-féle testek, amik a tapintás és nyomásérzésben vesznek részt (mechanoreceptorok).

#### B/ A kötőszövet idegvégződései:

- **szabad idegvégződések**,

- **fa-alakú elágazódás**, amely főleg a lazarostos kötőszövetben található mechanoreceptor,
- **gomolyok**, melyek az érrendszer specifikus kémiai receptorai (kemoreceptorok),
- **Golgi-féle ínorsó**, az izom, ínba való folytatásánál található mechanoreceptor,
- **idegvégtestek**,
  - **Krause-féle végtest**, korábban hidegérzékeny receptornak tartották, ma a bőr és a zsigerek falának mechanoreceptorai állítást tartják a leginkább megfelelőnek, ezekhez hasonló végződéses találhatók a nemi szervek erogén zónáin (pl.: makk),
  - **Vater-Pacini-féle idegvégtest**, a bőrben, ízületekben, sőt egyes zsigeri szervekben (pl. hasnyálmirigy) található, melyek nyomásra és vibrációra érzékenyek.

#### **C/ Az izomszövet idegvégződése:**

- **érzővégződés**,
  - **izomorsó**, ami a vázizomszövet ún. önérző receptora „proprioceptor”, melyek az izmok kontrakciós állapotát detektálják, szerepe a vázizomreflexek (részletesebben lásd 3.4. fejezet) kivitelezésében van,
- **mozgató**
  - minden vázizomrostnak van motoros beidegzése (lásd ideg-izom kapcsolat),
  - simaizomszövet beidegzése: vegetatív alapfonadék, gyöngyfűzészerű megvastagodásokkal (varikozitások)

#### **D/ Az idegszövet idegvégződése:**

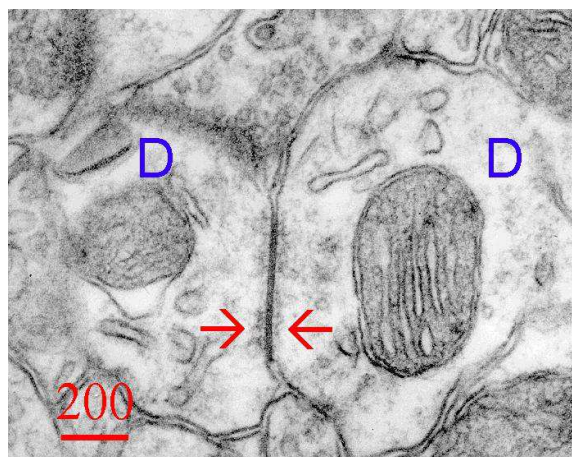
#### **A szinapszisok**

**Szinapszisnak** nevezzük azt a helyet, ahol az idegsejtek kapcsolódnak, kommunikálnak egymással. Szinapszisok általában az egyik idegsejt axonja, illetve a másik idegsejt dendritje (axo-dendritikus), sejtteste (axo-szomatikus), vagy axonja (axo-

axonikus) között alakulnak ki.. A neuronok közötti kapcsolatokat - természeti jellegük alapján – két kategóriába sorolhatjuk. Ennek alapján **elektromos-**, és **kémiai szinapszis**ról beszélhetünk.

### 2.6.2. Az elektromos szinapszis (gap junction)

Elnevezése onnan adódik, hogy rajta az ingerület elektromos úton, sebesen és akadálytalanul megszakítás nélkül, terjedhet egyik neuronális membránról a másik membránra. Az elektromos szinapszis esetén az ingerátadás többnyire kétirányú folyamat. Ebbe a kategóriába tartozó szinapszisok megjelenési formája az ún. **réskapcsolat, gap junction** (2-7. ábra). A név onnan származik, hogy a két kapcsolatban részt vevő membránok között csak egy nagyon kicsi távolság (2-4nm) figyelhető meg. A réskapcsolatokon kismolekulájú anyagok (aminosavak, cukrok) akadálytalanul juthatnak át. Kísérletek igazolták, hogy az alkohol gátolja az elektromos szinapszisok működését. Napjainkban a központi idegrendszer egyre több területén (gerincvelő, kisagy, retina) mutatnak ki elektromos szinapszist, melyek jelentős szerepet játszanak e szinapszisok információfeldolgozásban betöltött feladataik kiderítésében.



2-7. ábra: Elektromos szinapszis elektronmikroszkópos felvétele egér agykéregből

**D:** dendrit, **nyílak:** elektromos szinapszis. Aránymérce: 200  $\mu\text{m}$

### 2.6.3. Kémiai szinapszisok

Ebbe a kategóriába tartozó szinapszisokat is két különböző csoportba oszthatjuk, úgymint:

- **valódi** kémiai szinapszisok
- **nem valódi** kémiai szinapszisok

#### 2.6.4. A valódi kémiai szinapszisok

A szinapszis területét három fő egységre lehet felosztani. Megkülönböztetünk **szinapszis előtti membránfelszínt** (preszinaptikus membrán), **szinapszis utáni membránfelszínt** (posztzinaptikus membrán), ill. az ezek között található, az elektromos szinapszisonál jóval nagyobb **szinaptikus rést** (20-40nm).

Az akciós potenciál az előbbi fejezetben tárgyalt módon (ingerület terjedése) eljut az idegsejt végéhez, a szinaptikus végfácskához, ahol az ingerület továbbítása **ingerületátvivő anyagok** (neurotranszmitterek) közvetítésével valósul meg. Az ún. „klasszikus neurotranszmitterek”, mint pl.: acetilkolin, glutaminsav, glicin, gamma-amino-vajsav (GABA), katecholaminok, hisztamin, szerotonin olyan kis tömegű molekulák, melyek az idegvégződésekben szintetizálódnak. A klasszikus transzmitterek receptorai két csoportba sorolhatók. Az **ionotróp receptorok** (pl. ideg-izom szinapszis receptora) önmaguk egy ioncsatornát alkotnak, melyek a transzmitter megkötődése után nyílnak. A másik családba a **metabotróp receptorok** (pl.: GABA<sub>B</sub>) tartoznak, melyek nem tartalmaznak ioncsatornát, a neurotranszmitter speciális sejten belüli folyamatokat indít be.

A transzmitterek másik típusát a neuropeptidek alkotják, Ide sorolhatók egyebek között az endorfinok, enkefalinok, P-anyag, bombesin, VIP, gasztrin, NPY, valamint a kolecisztokinin egyaránt. A fent említett két típusnak az a közös jellemzője, hogy az idegvégződésekben szinaptikus vezikulákban tárolódnak.

\*Kiegészítés: A vezikulákban történő tárolást gyógyszerek, illetve különböző kémiai anyagok befolyásolhatják. Pszichostimulánsként alkalmazott drogok, mint az amfetamin és az 'ecstasy' kiüríti az amin tartalmú vezikulákat.

A harmadik típusba olyan neurotranszmitterek tartoznak, melyek rövid életidejű, kis molekulák (nitrogén-monoxid (NO), illetve szén-monoxid (CO)), közvetlenül a felszabadulásuk előtt keletkeznek, vezikulákban nem tárolódnak.

Akciós potenciál hatására a **szinaptikus hólyagocskák** (vezikula) - melyben az ingerületátvivő anyag található – a preszinaptikus membránhoz vándorol, és tartalmát a

szinaptikus részbe üríti (exocitózis). A transzmitterek felszabadulásának alapvető feltétele, hogy a sejten kívüli térből  $\text{Ca}^{2+}$ -ion áramoljon a sejten belülré. A szinaptikus részbe juttatott ingerületátvivő anyagok diffúzióval, a nagyobb koncentrációjú helyről (preszinaptikus membrán), a kisebb koncentrációjú helyre (posztoszínaptikus membrán) vándorolnak, ahol specifikus receptorokhoz kapcsolódnak. A receptorhoz kötött transzmitter hatására megváltozik a posztoszínaptikus membrán állapota (2-8. ábra).

Az ingerületátvivő anyagok hatásai alapján két csoportra oszthatjuk a szinaptikus kapcsolatokat. Beszélhetünk **serkentő** és **gátló szinapszisokról**.

- **Serkentő szinapszis**

Ennél a típusnál az ingerületátvivő anyag lehet, pl. acetilkolin, noradrenalin vagy glutaminsav. Ha a posztoszínaptikus membránban levő receptor megkötötte a transzmittert, kinyílik az ioncsatorna, és  $\text{Na}^{+}$ -ion vándorol a posztoszínaptikus membránon keresztül a sejt belseje felé, megváltoztatva annak töltésviszonyait. A posztoszínaptikus membránon úgynevezett **excitatórikus posztoszínaptikus potenciálváltozás (EPSP)** alakul ki. A keletkezett elektromos impulzust a membrán tovább vezeti, végül a posztoszínaptikus sejten több akciós potenciál alakul ki. A preszinaptikus membránról kiinduló, és a posztoszínaptikus membránban keletkezett potenciálváltozás között eltelt idő a **szinaptikus késés**, mely ember esetében 0,5ms körüli érték.

- **Gátló szinapszis**

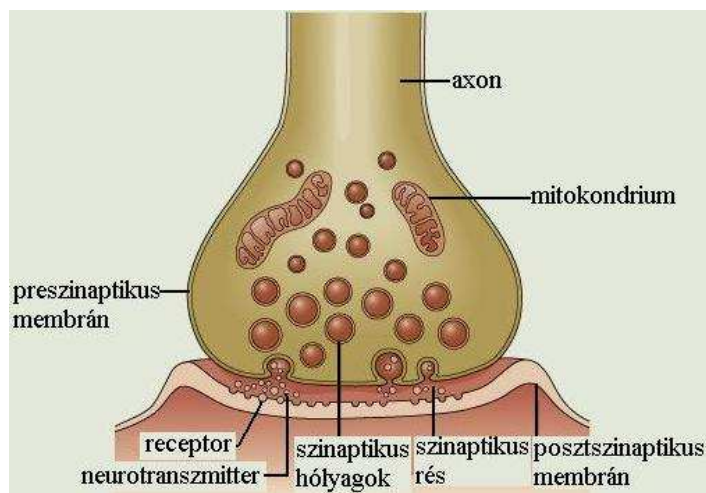
A szinapszisok e típusánál az ingerületátvivő anyag pl. a GABA (gamma-amino-vajsav), vagy a glicin. Ezek a neurotranszmitterek a posztoszínaptikus membrán receptoraihoz kapcsolódnak, melynek hatására a membrán  $\text{Cl}^{-}$ -iont ereszt át. A  $\text{Cl}^{-}$ -ionok hatására nő a negatív töltések aránya a sejten belül, a membrán hiperpolarizálódik, **inhibitoros posztoszínaptikus potenciálváltozás (IPSP)** jön létre.

\*Kiegészítés: Egyes neurotranszmitterek (dopamin, noradrenalin, szerotonin) serkentő és gátló hatásúak is lehetnek. Ha bizonyos agyterületeken csökken a fent említett neurotranszmitterek mennyisége, hangulatingadozások, depresszió alakulhat ki.

A kialakult EPSP-k és IPSP-k térben és időben szummálódnak, majd kizárólag az idegsejt axondombján (csak ott találhatók feszültségfüggő  $\text{Na}^{+}$ -csatornák) a

potenciálváltozásnak megfelelően (a minden vagy semmi törvény szerint) akciós potenciál keletkezhet.

Korábban említettük, hogy minden vázizomrostban motoros idegvégződéseket találhatunk. Az alábbiakban ezekkel a speciális végződésekkel, az ideg-izom kapcsolatokkal foglalkozunk részletesebben.



2-8. ábra: A valódi kémiai szinapszis működése

#### 2.6.5. Az ideg-izom kapcsolat (neuromuszkuláris junkció)

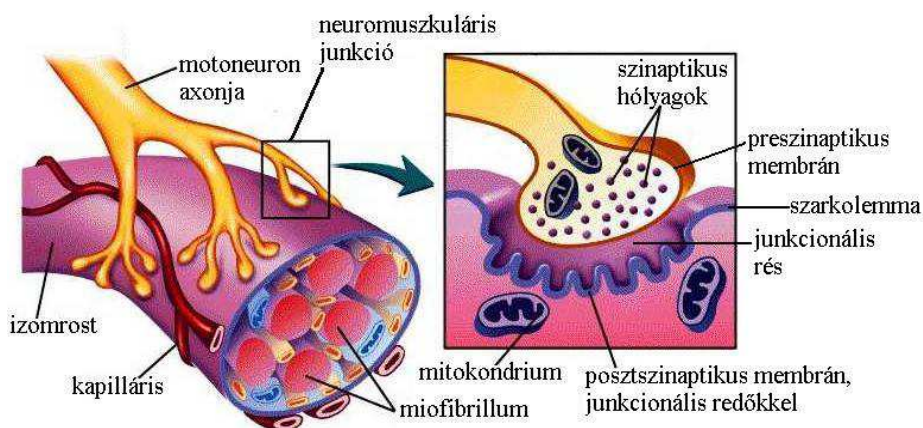
Gerinces szervezetek vázizmai a központi idegrendszerből hozzájuk futó idegrostok impulzusainak hatására húzódnak össze. Az idegrostokban keletkezett AP áttevődése az izomrostokra egy speciális **nem valódi kémiai szinapszisban**, az **ideg-izom szinapszisban** történik (2-9. ábra). Ilyen szinapszis a vázizomszövet és az izomrost érintkezési területe, a **motoros véglemez**.

#### A neuromuszkuláris junkció felépítése

A harántcsíkolt izmokhoz futó axonok a gerincvelő elülső szarvából (lásd. 3.1. fejezet) származó motoros neuronok. Egyetlen axon által beidegzett izomrostokat **motoros egységnek** nevezzük. A vastag velőhüvelyes axon, mely A $\alpha$  típusú motoneuron (ld. 2-1. táblázat), a vázizomrostok közvetlen közelében elveszti velőhüvelyét, elágazódik és a motoros véglemez **preszinaptikus részét** képezi. A végfácskában vezikulák



találhatók, melyek tartalmazzák a neuromuszkuláris junkció transzmitterét, az acetilkolint. A csupasz axonon számos kiöblösödést találunk, melyek benyomulnak az izomrost szarkolemmája által kialakított mélyedésekbe. A preszinaptikus rész és a szarkolemma között található a **junkcionális rész**, melynek vastagsága körülbelül 40-60nm. A szarkolemma által kialakított részen, a **posztiszinaptikus membránon** ujjszerű kitüremkedéseket, ún. **junkcionális redőket** figyelhetünk meg. Ezekben a redőkben helyezkednek el az ionotróp receptorcsaládba tartozó, **nikotin-típusú acetilkolin receptorok (nAChR)**.

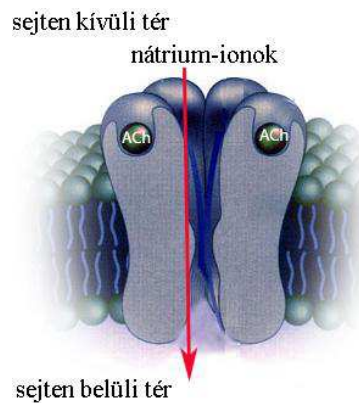


2-9. ábra: A neuromuszkuláris junkció szerkezete

### A neuromuszkuláris junkció működése

Az axonon keletkezett AP hatására megnyílnak a preszinaptikus végződés  $\text{Ca}^{2+}$ -csatornái, ionbeáramlás történik a sejtbe, melyet a végződésben található vezikulák szinaptikus részbe való exocitózisa követ. Egy-egy akciós potenciál több száz vezikula ürülését eredményezheti. A szinaptikus részbe jutó ACh diffúzióval a posztiszinaptikus membránhoz kerül, majd a saját specifikus receptorához, a nAChR-hoz kapcsolódik. A transzmitter megkötése után a receptor ioncsatornaként működik, melyen át  $\text{Na}^{+}$ -ionok áramlanak a szinaptikus részből a posztiszinaptikus membránon keresztül a sejtbe (2-10. ábra). A  $\text{Na}^{+}$  beáramlás következtében az izomrost depolarizálódik, akciós potenciál alakul ki, melyet az izom összehúzódása követ (lásd. 1.6. fejezet). A szinaptikus részbe került ACh molekulákat az **acetilkolin-észteráz** nevű enzim hatástalanítja.

\*Kiegészítés: 1.) A *Clostridium botulinum* nevű baktérium toxinja, a botulinumtoxin (Botox) gátolja az ACh-t tartalmazó vezikulák szinaptikus részbe történő exocitózist. A mérgezést követően a vázizomzat bénulásos tünetei figyelhetők meg. 2.) A dél-amerikai indiánok nyílméreg hatóanyaga, a kuráre a nAChR-hoz kapcsolódva gátolja az ACh molekulák kötődését. 3.) Mérgező harcigázok gátolják az acetilkolin-észteráz működését, ezáltal az ACh lebomlását.



2-10. ábra: A nikotin-típusú acetilkolin receptor működése

### 3. Az idegrendszer szerveződési szintjei

A gerincesek idegrendszerét anatómiailag és működésileg különböző csoportokra oszthatjuk.

Anatómiai felosztás szerint:

- **központi idegrendszer**, mely a gerincvelőből és agyvelőből (agytörzs, kisagy, köztiagy, nagyagy) épül fel,
- **perifériás idegrendszer**, ami a gerincvelői idegekből (31 pár) és agyidegekből (12 pár) áll.

A gerincvelői idegek alapvető felépítését és működését ld. a gerincvelő anatómiája (3.1.) és a gerincvelői vázizomreflexek című (3.3.) fejezetekben. Az agyidegek anatómiájával a 3.9. fejezetben foglalkozunk.

Működési felosztás:

- **szomatikus idegrendszer**, mely magába foglalja az idegrendszer érzőműködéseit, és akaratlagos vagy automatikus mozgatóműködéseit (lásd. 4. fejezet),
- **vegetatív idegrendszer**, többnyire nem tudatosuló, a vegetatív szervek működését (pl.: keringés, légzés, emésztés) szabályozó idegrendszer (lásd. 3.11. fejezet).

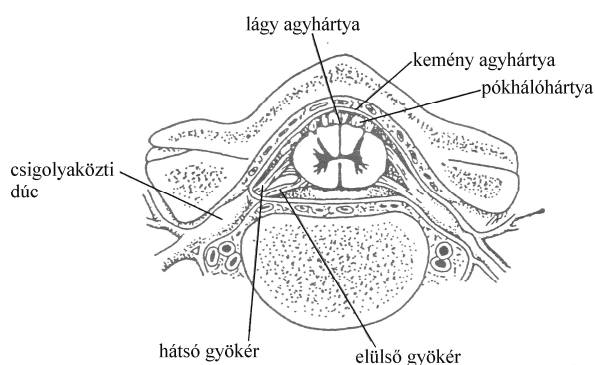
#### 3.1. A gerincvelő anatómiája

A **gerincvelő** vagy gerincagy (*medulla spinalis*) kisujjnyi vastagságú, a gerinccsatornában elhelyezkedő üreges szerv (3-1. ábra). A testből jövő információk nagy része a központi idegrendszer e szakaszán halad át és feldolgozásuk már ezen a szinten megkezdődik. A gerincvelő felszínét az **agyhártyához hasonló kötőszövetes burkok** borítják, melyek a csontos koponyától való védelmet biztosítják. Emlősökben három burkot tudunk elkülöníteni, melyek belülről-kifelé haladva a következők:

- **lágyszövetes agyhártya** (*pia mater*), ami közvetlenül a gerincvelő felszínét borítja, két lemezből áll, melyek között öblök (szinuszok) találhatóak,

- **pókhálórátya** (*arachnoidea*), mely hozzáfekszik a kemény agyrátyaához,
- **kemény agyrátya** (*dura mater*), egy erős rostos lemez, ami a gerinccsatorna belső felszínét borítja.

A lágy-, ill. a pókhálórátya között keskeny hasadék található, melyet szubarachnoideális térnek is nevezünk. Ezt a teret az **agy-gerinccvelői folyadék** (*liquor cerebrospinalis*) tölt ki.

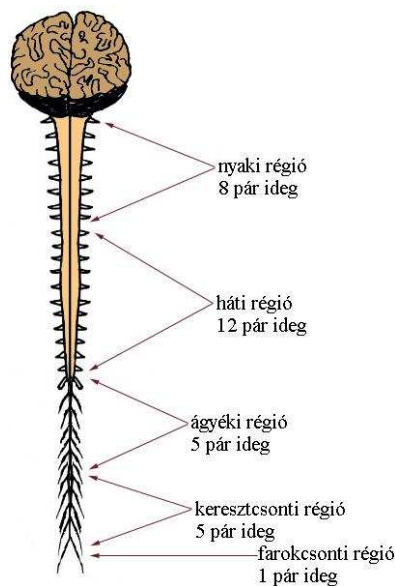


3-1. ábra: A gerinccvelő elhelyezkedése a gerinccsatornában

/Forrás: Csoknya, *Az idegrendszer összehasonlító morfológiája*, 1998./

A gerinccvelő kezdete az **öreglyuknál** található és az első (férfiaknál) vagy második (nőknél) ágyékcsigolya magasságában, **fonalszerű maradványban** végződik. A gerinccvelőt, a gerinccszlophoz hasonlóan különböző szakaszokra oszthatjuk (3-2. ábra). Ennek alapján **nyaki** (*cervicalis*), **hát**i (*thoracalis*), **ágyéki** (*lumbalis*), **keresztcsonti** (*sacralis*) és **farki** (*coccygealis*) **régiókról** beszélhetünk. A különböző régiókban a szelvények száma fajoként eltérő. Emberben 8 nyaki, 12 háti, 5 ágyéki, 5 keresztcsonti, 1 csökevényes farki szelvényt találhatunk.

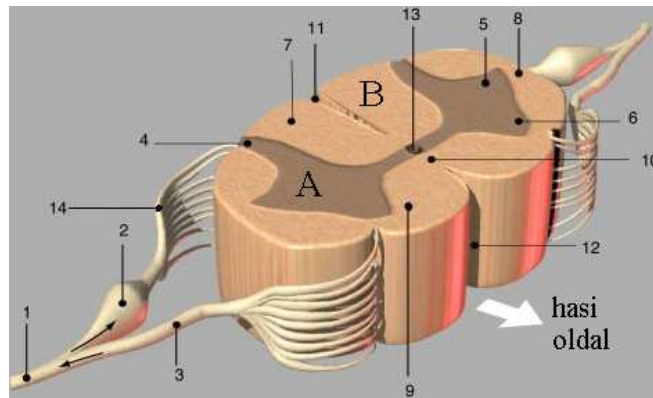
\*Kiegészítés: Csak érdekességként említjük meg, hogy az emlősökön belül, a gerinccvelő szelvényezettsége nem mutat számottevő eltéréseket, azaz pl. az emberre jellemző 8 nyaki szelvény más emlősalatban pl. a zsiráfban is ugyanúgy megtalálható.



3-2. ábra: A gerincvelő szakaszai

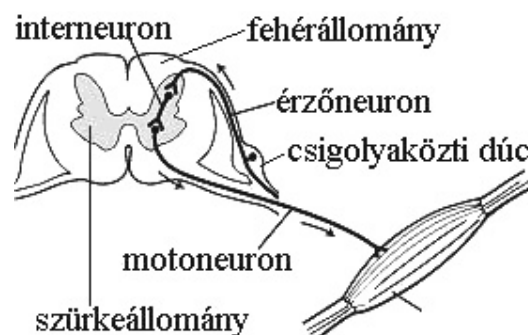
A gerincvelő keresztmetszetén (3-3. ábra) két részt tudunk elkülöníteni, a **belső szürkeállományt** (*substantia grisea*), és az azt körülvevő **fehérállományt** (*substantia alba*). Elülső felszínén egy mély **hasadék** (*fissura mediana anterior*), míg a hátsó felszínén egy kis **barázda** található. A szürkeállomány pillangóhoz („H” betű) hasonlítható, melynek közepén a **központi csatorna** (*canalis centralis*) található. A szürkeállomány hátsó szára a gerincvelő **hátsó szarva** (*cornu posterius*), míg az előre felé kiugró, valamivel vastkosabb rész az elülső vagy **mellső szarv** (*cornu anterius*). Az elülső hasadék és a szürkeállomány között az ún. **fehér összekötő ereszték** (*commissura alba*) található. A gerincvelő híti és ágyéki szakaszán a hátsó és elülső szarv között oldalt is található egy kiemelkedés, amit oldalsó szarvnak (*cornu laterale*) nevezünk, melynek a vegetatív idegrendszerben van szerepe. A szarvak térben oszlopokat (*columna*) alkotnak.

A gerincvelői idegek **hátsó**-, ill. **mellső gyökéren** keresztül a gerincvelőből erednek, majd minden gerinces állatban egyesülve, kevert **gerincvelői idegeket** (érző-, ill. mozgatórostokat egyaránt tartalmaz) alkotnak. A **hátsó gyökéren**, a hátsó szarvba belépő **érzőneuronok** sejtteste a **csigolyaközi dúcban** (*ganglion spinale*) található. A hátsó szarv mindig érző-, az elülső szarv mindig **mozgatóneuronokat** tartalmaz. Köztük lehetnek a szürke állományt el nem hagyó **interneuronok** (3-4. ábra).



3-3. ábra: A gerincvelő metszetének térbeli modellje

**A:** szürkeállomány, **B:** fehérállomány; **1,** gerincvelői ideg; **2,** csigolyaközi dúc; **3,** elülső gyökér; **4,** hátsó szarv; **5,** oldalsó szarv; **6,** elülső szarv; **7,** hátsó köteg; **8,** oldalsó köteg; **9,** elülső köteg; **10,** fehér összekötő ereszték; **11,** hátsó barázda; **12,** elülső hasadék; **13,** központi csatorna; **14,** hátsó gyökér.



3-4. ábra: Az érzőneuronok, az interneuronok és a motoneuronok elhelyezkedése a gerincvelőben

A szürkeállományt rétegekre, úgynevezett **laminákra** lehet osztani. A felosztásnál azt kell figyelembe venni, hogy a neuronok sejttestjei hol helyezkednek el. Ennek alapján 10 laminát tudunk elkülöníteni, melyeket római számokkal jelölünk. A rétegek számozása a hátsó szarvtól kezdődik az elülső szarv felé.

A szürkeállomány neuronjait a szerint is csoportosíthatjuk, hogy az axonjaik merre hagyják el a szürkeállományt. Ennek alapján elkülöníthetünk **radiculáris vagy**

**gyökérsejteket**, melyek axonjai az elülső gyökéren keresztül hagyják el a gerincvelőt. Megkülönböztetünk **funiculáris vagy kötegi neuronokat**, melyek axonjai az oldalsó kötegbe lépnek. Végezetül **comissurális vagy eresztéki neuronokat** ismerünk, melyek axonja a fehér eresztékben kereszteződnek a gerincvelő területén.

A szürkeállományt körülölelő fehérállomány felépítését a következő fejezetben tárgyaljuk.

### 3.2. Gerincvelői pályák

#### 3.2.1. A fehérállomány szerkezete

A gerincvelő fő feladata az összeköttetés biztosítása a központi idegrendszer alacsonyabb és magasabb szintjei között. Ez alapján a kívül elhelyezkedő **fehérállomány** (*substantia alba*) nagy részét hosszában futó, velőhüvelyes rostok képezik. A fehérállományt - a gerincvelő mindkét felében - az onnan ki-, és belépő rostok **kötegekre** (*funiculus*) osztják (3-3. ábra), így megkülönböztetünk:

- **elülső köteget** (*funiculus anterior*), ahol az egyik legfontosabb felszálló pálya a *tractus spinothalamicus* található. A másik fontos pálya, ami itt található, a kereszteszetlen piramispálya (*tractus corticospinalis directus*), ami egy leszálló mozgatópálya.
- **oldalsó köteget** (*funiculus lateralis*), ahol fel- és leszállópályákat egyaránt találunk. Itt láthatjuk a kisagyba futó *tractus spinocerebellaris dorsalist* és *ventralist*. Ezen a területen lokalizálható a keresztezett piramispálya (*tractus corticospinalis cruciatus*), melyek rostjai a gerincvelő mellső szarvi motoneuronoknak adják át az ingerületet. Az oldalkötegben találhatóak a leszálló vegetatív pályák is, melyek a magasabb központokból induló motoros pályákat tartalmazzák, melyek az oldalsó szarvi vegetatív sejtekhez futnak.
- **hátsó köteget** (*funiculus posterior*), melyek pályái az epikritikus szenzibilitásért (mély nyomás, vibráció, helyzetérzékelés) felelős információkat tartalmazzák.

Mediálisan a Goll-féle pálya, laterálisan a Burdach-köteg található

A különböző kötegeken belül, számos rostnyaláb-csoportot tudunk elkülöníteni, melyek a központi idegrendszer **gerincvelő pályáit** alkotják. A gerincvelő pályarendszereit asszociációs, felszálló (afferens) és leszálló (efferens) csoportra tudjuk felosztani:

### 3.2.2. Az asszociációs pályák

A gerincvelőből eredő és a gerincvelőben végződő rövid pályák tartoznak ebbe a csoportba.

### 3.2.3. Felszálló (afferens) pályák

Ezek a pályák a gerincvelőt kötik össze az agy különböző régióival:

- **Goll-Burdach**, mely a bőrből, izmokból, ízületekből származó érzőingerületeket szállít a nyúltsvelőig (Goll-Burdach magok, lásd 3.5. fejezet), ahol végződik, ill. átkapcsolódik, s a talamuszon keresztül a nagyagykéregbe jut,
- **Flechsig**-féle nyaláb, ami az izmokról, inaktól közvetít ingerületet a kisagyhoz,
- **Gowers**-féle nyaláb, az ín-, illetve izomorsókból továbbít ingerületet a kisagyba,
- **Edinger**-féle nyaláb, ami a legfontosabb érzőingerületet szállító pálya. Fájdalom- és hőérzeteket szállít a talamuszon keresztül a nagyagykéregbe.

### 3.2.4. Leszálló (efferens) pályák

Ezek a pályák az agy különböző szakaszait kötik össze a gerincvelő motoros sejtjeivel:

- **piramispálya** (*tractus corticospinalis*), mely a nagyagykéreg frontális lebenyének piramis-sejtjeiből indul ki (lásd 4.1. fejezet),
- agytörzsi sejtcsoportokból kiinduló másnéven **extrapiramidális pályák** (*tractus vestibulospinalis, reticulospinalis, olivospinalis, tectospinalis, rubrospinalis*) (lásd 6.1. fejezet),
- **fájdalomérzést szabályozó** leszálló pálya.

## 3.3. Gerincvelő idegek (*nervi spinales*)

A gerincvelő idegek a környéki idegrendszer részét képezik. Számuk 31 pár, ebből 8 nyaki, 12 háti, 5 ágyéki, 5, keresztáji, 1 farki idegpár. Egy-egy gerincvelői ideghez tartozó részt **szegmentumnak** nevezünk. Az egyes gerincvelői szegmentumok által beidegzett bőrterületet **dermatómának** nevezzük. A dermatómák érzéskieséséből tudunk következtetni a gerincvelői szegmentumi sérülések lokalizációjára. Egy **gerincvelő szelvényen** azt értjük, ahonnan egy pár gerincvelő ideg ered. A gerincvelő idegekre az alábbi jellemzők érvényesülnek:



- **páros idegek**, azaz a gerincvelő szelvényéből a jobb és baloldalon 1-1 ideg lép ki, melyek egy dorzális (*ramus dorsalis*) és egy ventrális (*ramus ventralis*) ágra oszlanak,
- **kevert idegek**, melyek érző és mozgató rostokat egyaránt tartalmaznak,
- **két gyökérrel rendelkeznek**, a hátsó gyökér a hátsó szarv, míg az mellső gyökér az elülső szarv végén ered. A hátsó gyökérben érzőrostok futnak, itt található a csigolyaközi dúc, a mellső gyökérben mozgatórostokat találunk. A mellső gyökér gerincvelő háti- és ágyéki szakasz idegeiben vegetatív szimpatikus rostok is haladnak. Ezek a vegetatív rostok két összekötő ággal (fehér ág, *ramus communicans albus*, illetve szürke ág, *ramus communicans griseus*) ún. vegetatív határkötegi dúcokhoz kapcsolódnak,
- **szimmetrikus lefutásúak, a test középvonalát nem lépik át.**

### 3.4. Gerincvelői vázizomreflexek

A gerincvelői reflexek lehetővé teszik, hogy bizonyos egyszerűbb mozgási funkciók automatikusan végbemenjenek, agykérgi irányítás és tudatosulás nélkül. A reflex nem más, mint az adott stimulusra automatikusan bekövetkező ingerválasz.

Az idegrendszer működési egysége a **reflexív**, mely az ingert felfogó receptorokból, az afferens szárból, a központból, az efferens szárból, valamint a végrehajtó szervből, az effektorból áll. A gerincvelői reflexek íve a gerincvelőben záródik, de ez nem jelenti azt, hogy a reflexet kiváltó inger nem kerül észlelésre magasabb szinten (agykéreg), illetve, hogy a legmagasabb szintű központok nem hatnak vissza le a reflexív működésére. Beállítják és szabályozzák izmaink tónusát, feszítettségét, szabályozzák testtartásunkat, és mozdulataink kivitelezését. Általában csak nagyon pontosan meghatározott inger válthat ki egy adott reflexet. Az adott reflex kiváltásához szükséges legkisebb ingert **adekvát ingernek** nevezzük. Adekvát inger pl. a kutya számára a rovar mászása, mely vakarózási reflexet indít be. Ugyanakkor, ha a többszörös ingerek nem esnek egybe, akkor a vakarózás elmarad. A bolhák ugrálva közlekednek, így az ugrások elválasztják egymástól az érintési ingereket, és nem keletkezik adekvát inger a vakarózáshoz, a reflex nem alakul ki.

A következőkben a legfontosabb reflexeket ismertetjük:

### 3.4.1. Nyújtási (izomeredetű, saját, vagy miotatikus) reflex

A reflex elsősorban az antigravitációs izmokban jelentkezik. A nyújtási reflex receptora az izomban elhelyezkedő **izomorsó**, mely az izom megnyúlását, feszülését érzékeli.

Az izomorsók, melyek 4-10 mm-es hosszúságú, kötőszövetes tokkal rendelkező képletek, az izomra ható feszítésről tájékoztatják a központi idegrendszert. Bennük kétfajta afferens idegvégződés található, melyek a feszítettség dinamikus és statikus összetevőinek analízisét végzi. Az izomorsók belsejében **intrafuzális izomrostok** helyezkednek el, melyek két végükön tartalmaznak kontraktilis részeket. A középső nem kontraktilis szakasz kizárólag csak a nyújtásra érzékeny szenzoros végződéseket tartalmazza. Az izomorsók belsejében háromféle intrafuzális rost található: (i) dinamikus magzsákróst (ii) statikus magzsákróst (iii) néhány magláncrost. Az afferens axonok (Ia, II típusú) végződésai spirálisan hálózják be az intrafuzális rostok középső részét. Az izomorsók a tényleges izomkontrakciót létrehozó **extrafuzális rostokkal** párhuzamosan helyezkednek el. Amikor az extrafuzális izmok összehúzódnak az izomorsók feszítettsége csökken. Kisegítő mechanizmus hiányában az izom kontrakciója alatt az izomorsók nem érzékelnék az izom feszítettségét, melyre a motorikát koordináló idegrendszeri struktúráknak alapvető szükségük van. Az izomorsók érzékenységét egy speciális mechanizmus, az ún.  **$\gamma$ -efferensek** ( $A\gamma$ -efferens rostok) segítik, melyek az intrafuzális rostok összehúzódását hozzák létre, ezzel szabályozzák az izomorsók nyújtással szembeni érzékenységét. Akaratlagos izomműködés esetén egyidőben aktiválódnak a motoros működésért felelős  $A\alpha$ -, illetve az izomorsó érzékenységét beállító  $A\gamma$ -neuronok.

Az izomorsókból az érzőinformációk a csigolyaközi dúcokban elhelyezkedő ganglionsejtek közreműködésével a gerincvelő szürkeállományába jutnak. Az érzőneuronok axonjai közvetlenül  $A\alpha$ -motoneuronokkal szinaptizálnak a szürkeállomány elülső szarvában. A motoneuronok végül visszaküldik axonjaikat abba az izomba, ahonnan a nyújtási inger érkezett és összehúzzák azt. Ez a legrövidebb reflexkör az emberi szervezetben, rövidebb köre mindössze két idegsejtből és az őket összekötő szinapsziszból

áll (**monopszinaptikus reflex**). Az érzőneuron axonjának másik ága egy interneuron közbeiktatásával az ellentétesen működő (antagonista) izmot relaxálja (3-5. ábra/A). A miotatikus reflex szerepe az antigravitációs mozgások kivitelezése és a mozgáskoordináció. Ide tartozik pl. a közismert és az orvosi diagnosztikában gyakran használt **patellareflex**. A térdkalács alatti ínra (*ligamentum patellae*) reflexkalapáccsal ütést mérve a comb feszítőizma megnyúlik, majd az reflexkör lefutása után ugyanezen feszítő izmok összehúzódnak és az alszár „kirúg”. A nyújtási reflex antigravitációs feladatait úgy látja el, hogy fenntartja a test egyensúlyi helyzetét ülő, vagy álló testhelyzetben, vagy akár mozgás közben is. Képzeljük el, hogy egy álló ember teste kissé előrebillen. Ilyenkor a láb hátsó felszínén lévő izmok megnyúlnak (pl. a háromfejű lábikraizom), majd a miotatikus reflex hatására gyorsan összehúzódnak, és ezáltal hátrafelé döntve visszahozzák a testet a kiindulási egyensúlyi testhelyzetbe.

#### 3.4.2. Inverz nyújtási reflex

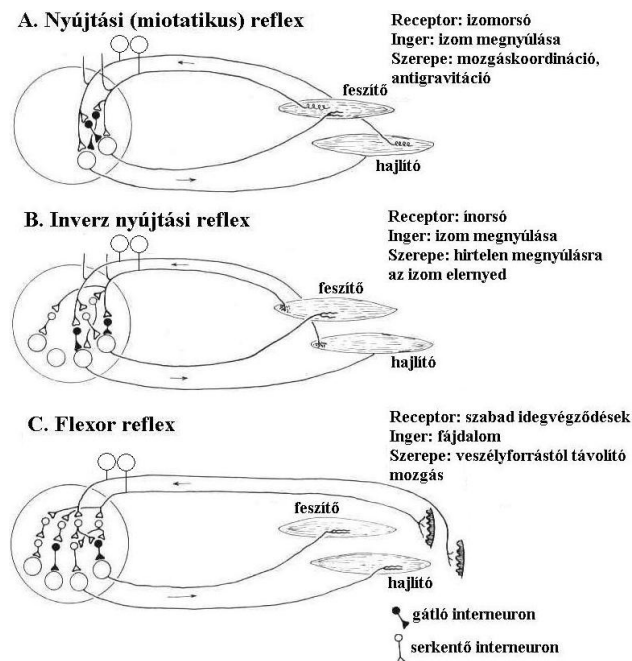
Ez a reflex az előzővel éppen ellentétes működésű. A túlnyújtást és az ebből fakadó sérülést hivatott kiküszöbölni (tehermentesítő reflex). A reflex az izom túlzott megnyúlására, elernyedéssel válaszol. Receptora a **Golgi-féle ínorsó**, mely az izom és az ín találkozásánál, az ín kollagén rostjai között helyezkedik el, és az izom megnyúlását érzékeli. Az ínorsók - ellentétben az izomorsókkal – sorosan kapcsolódnak az extrafuzális izomrostokhoz. Az extrafuzális izomrostok megrövidülése meghúzza az ínorsóban található kollagénrostokat, és az ott található axonokban (Ib afferens) akciós potenciál keletkezik.

A központba érkező érző rost **gátló interneuronon** (glicinerg neuron) keresztül csökkenti a motoneuron aktivitását, így az izom, amelyből az ingerület kiindult, relaxálni fog. Az antagonista izom összehúzódik. Erős inger esetén, az ingerület képes átkereszteződni a gerincvelő másik oldalára is (**reflex irradiáció**), ahol a feszítő izmok összehúzódnak (3-5. ábra/B).

#### 3.4.3. Flexor reflex

A flexor reflex az előzőekkel ellentétben a testre kívülről érkező információkat dolgozza fel, receptorai a bőrben elhelyezkedő **szabad idegvégződések**, melyek a fájdalmat érzékelik. A fájdalominger a gerincvelőbe érkezve, többszörösen átkapcsol

(**poliszinaptikus reflex**). Több interneuronon keresztül gátolja az azonos oldali fesztő izmokat, míg serkenti a hajlítókat, így a végtag a veszélyes ingertől távolító mozgást végez. Az ellenkező oldali végtagizmokat ellentétesen aktiválja (keresztezett extenzorreflex), úgy, hogy a fesztőizmokat összehúzza, míg a hajlítókat relaxálja, ezáltal megakadályozza a test egyensúlyának elvesztését (3-5. ábra/C).



3-5. ábra: Gerincvelői vázizomreflexek sematikus ábrája  
 (a szürke- és fehérállomány nincs külön ábrázolva)

A: nyújtási (miotatikus) reflex; B: inverz nyújtási reflex; C: flexor reflex

### 3.5. Az agytörzs

Az agytörzs a gerincvelő folytatása. Részei a **nyúltvelő** (nyúltagy), a **híd** és a **középagy** (3-6. ábra). A z agytörzs hátsó felületén egy mélyedés található, melyet **rombus ároknak** (*fossa rhomboidea*) nevezünk. Ez az árok a IV. agykamra.

#### 3.5.1. A nyúltagy szerkezeti egységei és funkciói

- A nyúltagi piramisban kereszteződnek át a **piramispálya** axonjai,
- itt található a **Goll- és a Burdach-mag** (*nucleus gracilis és nicleus cuneatus*), illetve a *lemniscus medialis* melyek a gerincvelői felszállópályák fontos állomásai. Ez a pályarendszer szállítja az epikritikus szenzibilitásért (finom tapintás, végtagok helyzete, mozgása) felelős információkat. A pálya a talamusz nucleus ventralis posteromedialis (VPM) és nucleus ventralis posterolateralis (VPL) magjain átkapcsol, majd a szomatoszenzoros kéreg (*gyrus postcentralis*) Brodmann 3,1,2 areáin végződik,
- a mellső és oldalsó köteg határán található az **olajkamag** (*oliva inferior*), mely az extrapiramidális rendszer egyik fontos központja. Innen indul ki a gerincvelő felé a *tractus olivospinalis* pálya, illetve a kisagy felé a korábban említett kúszórost, a *tractus olivocerebellaris*,
- itt hagyja el az agyat a **IX., X., XI. és a XII. agyideg** (lásd 3.9. fejezet),
- itt található a **keringésszabályozás** két központja a vérnyomásfokozó (presszor) és a vérnyomáscsökkentő (depresszor) központ,
- a **légzésszabályozás** két fontosabb központja is itt helyezkedik el, a belégzést megindító belégzési ritmus generátor és a gátló vágusz sejtek, melyek leállítják a belégzést, így megindulhat a kilégzés,
- a nyúltvelő-híd határán találhatóak a **vesztibuláris magok**, ill. a hídba is átnyúló **formatio reticularis** (agytörzsi hálózatos állomány), melyek a helyzetérzékelésben és az izomtónus kialakításában fontosak (lásd 6.1. fejezet). A formatio reticularis részének tekinthetők a keringési - és légzésközpontok, ill. a nyelési - és hányási reflexek központjai is. Az innen kiinduló pályarendszer (*tractus reticulospinalis*) az extrapiramidális vezérlésben játszik szerepet.

### 3.5.2. A híd szerkezeti egységei és funkciói

- A **hídkarok** összekötik a kisagyat a nagyaggyal és a kisagyat a gerincvelővel (3-6. ábra),
- **magasabb rendű légzésközpontok** találhatók itt, melyek képesek a nyúltvelői légzésközpontok működését agykérgi tudatos parancsra felülbírálni, mely fontos lehet, pl. a beszédhangok létrehozásakor,

\*Kiegészítés: Keringési központok nincsenek a hídban, ezért a légzéssel ellentétben, vérnyomásunkat kevésbé tudjuk akaratlagosan (agykérgi parancsra) befolyásolni.

- itt lép ki az **V., VI., VII. és a VIII. agyideg** (lásd 3.9. fejezet),
- a **formatio reticularis** a nyúltvelőből kiindulva egészen a hídig húzódik, szerepeit lásd a nyúltvelőnél korábban,
- itt található az agy szerotonin gyártó központja a **raphe-mag**, innen a gerincvelőbe leszálló pályák indulnak, melyek részt vesznek a fájdalomérzések csillapításában, ill. felszálló pályák is indulnak az agykéregbe és a hippocampusba, melyek a memória, a motivációk és sok más magasabb rendű agyi működés szabályozásában vesznek részt.

### 3.5.3. A középagy szerkezeti egységei és funkciói

- A középagy felső része a **tectum**, mely főleg egyszerű látóinformációkat (fényérőrzékelés, mozgásérzékelés) feldolgozó agyterület. Az innen kiinduló pálya (*tractus tectospinalis*) az extrapiramidális rendszer egy része,
- itt található a **középagyi vörösmag** (*nucleus ruber*) melyből fontos gerincvelői leszállópálya (*tractus rubrospinalis*) indul ki. Szerepe van a testtartás kialakításának szabályozásában (lásd. 6 1. fejezet),
- fontos része a **középagyi feketemag** (*substantia nigra*), mely a bazális ganglionok közé tartozik. A feketemag két szövettani részre a *pars compacta* és a *pars reticulata*ra osztható. A *pars compacta* idegsejtjeinek egy része dopamint termel, melyek egy speciális pályán keresztül jutnak el a striatumba, ahol befolyásolják annak működését. Mindezek alapján a *pars compacta*nak az extrapiramidális mozgásszabályozásban van szerepe (lásd 4.2. fejezet), valamint az itt található dopamin tartalmú idegsejtek sérülése okozza a **Parkinson-kórt**. A

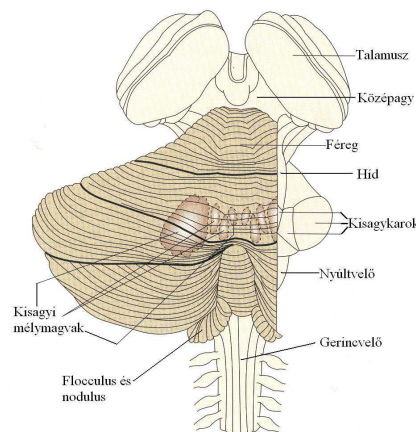
pars reticulata a törzsdúcrendszer kimeneti magja a talamusz felé. Funkciói közé tartozik az automatikus mozgások szabályozása, a szemmozgások koordinálása, az orientáció, illetve a tekintet stabilizációja. Parkinson-kór esetében ezek a területek is sérülnek.

### 3.6. A kisagy

A kisagy (*cerebellum*) a legfontosabb **mozgáskoordináló** agyterület. Szerteágazó funkciói miatt több témában is utalni fogunk rá, valamint ebben a fejezetben röviden összefoglaljuk felépítését és működését.

#### 3.6.1. A kisagy anatómiája

A kisagy a hídnál a kisagykarokkal kapcsolódik az agytörzshöz (3-6. ábra). **Két féltekéje** van, melyeket középen a **féreg** (*vermis*) választ el egymástól. A két félteke külső részén tekervényezett szürkeállomány figyelhető meg. A belső fehérállományban található a **kisagyi mély magvak**. A kisagy alapjához csatlakozik a kisagy ősbibb evolúciós eredetű része a **flocculus** (pelyhecske) és a **nodulus** (csomócska).



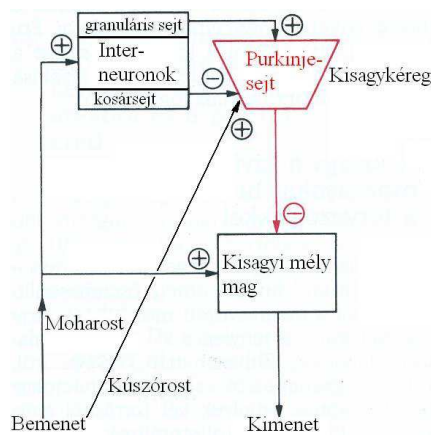
3-6. ábra: A kisagy, mögötte az agytörzs, illetve a talamusz elhelyezkedése hátulnézetben, a két nagyagyfélteke eltávolítása után

#### 3.6.2. A kisagy sejtszintű működése

A kisagy funkcionális egysége a kisagyi modul (3-7. ábra). A kisagyba érkező információk **moharostokat** és **kúszórostokat** alkotnak, melyek közül a moharostok **interneuronokon** (granuláris sejt, kosársejt) keresztül kapcsolódnak a kisagykéreg

legfőbb sejtjeihez, a **Purkinje sejtek**hez, míg a kúszórostok közvetlenül érik el azokat. A kisagyba futó rostok a következő területekről hoznak információkat:

- helyzetérzékeléssel kapcsolatos információk átkapcsolás nélkül, közvetlenül a **vesztibuláris idegeken** (*tractus vestibulocerebellaris*),
- szintén helyzetérzékelési információk a **nucleus vestibularis inferiorból**,
- felszálló érzőinformációk a **gerincvelőből** az izmok tónusáról (*tractus spinocerebellaris*),
- információk a **nagyagykéreg** összes lebenyéből (*cortico-ponto-cerebellaris*),
- információk a **formatio reticularis**-ból.



3-7. ábra: A kisagyi információáramlás vázlata

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 864.oldal, 35-24. ábra alapján/

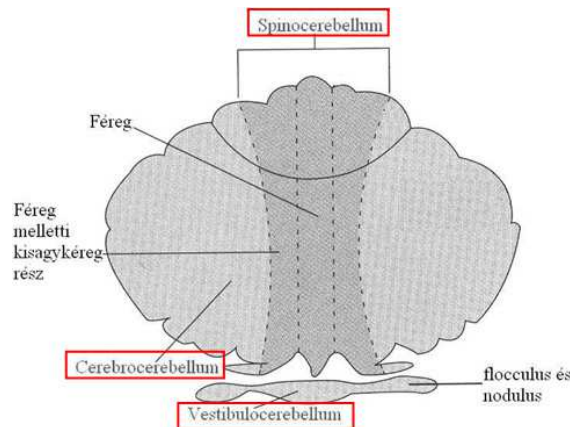
A **granuláris sejtek** serkentik, míg a **kosársejtek** gátolják a Purkinje-sejtek működését. A Purkinje-sejtek axonjukkal ezután lejutnak a **kisagyi mélymagok**hoz és gátolják azokat. A kisagyi mélymagok axonjai adják a kisagy kimeneteit, melyek elsődlegesen a formatio reticularis-ba, a középagyon keresztül a talamuszba, ill. a középagyi vörösmagba jutnak.

\*Kiegészítés: Gyakorlatilag kisagyi mélymagnak tekinthető a kisagyon kívül-, a nyúltvelő-híd határán elhelyezkedő Deiters-mag (nucleus vestibularis lateralis) is, mivel közvetlen bemenetet kap a flocculus és a nodulus Purkinje-sejtjeiből. A Deiters-mag az egyik legfontosabb testtartást kialakító központ (lásd 6.1. fejezet).



### 3.6.3. A kisagy főbb funkcióinak csoportosítása

A kisagy funkcióit három csoportba oszthatjuk, ez a három feladat szorosan kötődik három jól elkülönülő kisagyterülethez (3-8. ábra).



3-8. ábra: A kisagy funkcionálisan elkülönülő részei (piros kerettel jelölve)

#### A/ Vestibulocerebellum:

A kisagy alapjánál elhelyezkedő flocculus és nodulus alkotja a vestibulocerebellumot, mely nevéből adódóan az **egyensúlyérzékelésben**, a helyzetérzékelésben, és a testtartás szabályozásában játszik szerepet. Közvetlen kapcsolatban áll a Deiters-maggal, információkat kap a vestibuláris érzékszervből és a *nucleus vestibularis inferiorból*.

#### B/ Spinocerebellum:

A spinocerebellumot a féreg és a közvetlenül mellette lévő kisagykéreg rész alkotja. Szerepe a **mozgáskoordináció**: a tervezett mozgásokat hasonlítja össze a már kivitelezettekkel, és szükség esetén korrekciós utasításokat közvetít az izmok felé. Bemeneteket kap az agykéregből (mozgástervek) és felszálló információkat a gerincvelőből (izmok állapota).

#### C/ Cerebrocerebellum

A kisagyféltekék oldalsó része alkotja a cerebrocerebellumot. A kisagy legfejlettebb része, a legtöbb információt képes tárolni. Ennek megfelelően feladata a

**mozgások tanulása** és a már **megtanult mozgások rögzülése**. A tanult bonyolultabb mozdulatsorok indítása is innen történik, pl. az írás folyamata során, az extrapiramidális pályarendszer segítségével (lásd 4. 2. fejezet). Az akaratlagos mozgások tervezésében jelentős premotor agykéreggel és a középagyi vörösmaggal van közvetlen kapcsolatban.

### 3.7. A köztiagy

A köztiagy a középagyat a két nagyagyféltekével összekötő, a III. agykamra két oldalán elhelyezkedő agyterület. Fontosabb részei az epitalamusz, a talamusz és a hipotalamusz.

#### 3.7.1. Az epitalamusz

Legfontosabb része a **tobozmirigy**, mely fényérzékelő bemeneteket kap, és sötétben szerotonint alakít át **melatoninná**. A napsütéses órák csökkenésével párhuzamosan nagy mennyiségben felhalmozódó melatonin depressziót okozhat. Ezt a tünetegyüttest **skandináv depresszió**nak nevezzük.

#### 3.7.2. A talamusz

Ha az agyat egy számítógéphez hasonlítanánk, akkor a talamusz lenne benne a processzor ('tudat kapuja'). Feladatai rendkívül sokrétűek. Általánosan elmondhatjuk, hogy az érzékszervekből érkező információkat szelektálja és sok a gondolkodással, figyelemmel kapcsolatos műveletet végez. Minden érzékszervből érkező információnak - kivétel a szaglás - itt van az utolsó agykéreg előtti **átkapcsoló állomása**. A talamusz dönti el, mely információk fontosak a gondolkodáshoz, és melyek lényegtelenek. A nem fontos információkat ezután „törli”, a fontosakat pedig ún. **reverberációs körökre** helyezi (lásd 6.5. fejezet), melyek alkotják a **rövidtávú memóriát** és belőlük később, hosszú távú emlékek képződhetnek.

\*Kiegészítés: A szaglóinformációk a talamusz érintése nélkül is elérhetik az agykérget. A talamusz szerepe így kiesik, ezért tapasztalhatjuk azt, hogy szagokra kevésbé szelektál az agy. Míg pl. egy nem fontos hangingerre nem figyelünk oda, addig minden szaginger eljut a tudatunkig és befolyásolja viselkedésünket. Nem véletlen, hogy a testünk által

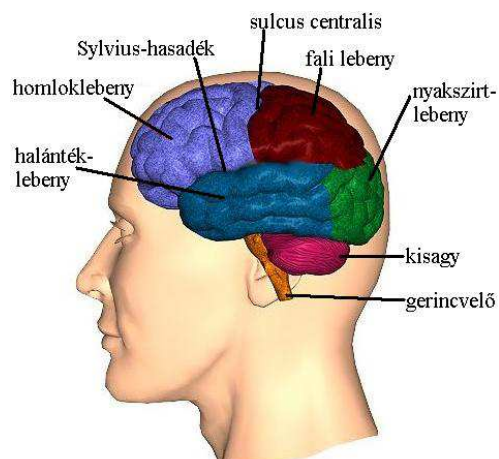
kibocsátott illatanyagok, a feromonok, döntően meghatározhatják egymás iránti negatív vagy pozitív érzelmeinket, ill. szexuális magatartásunkat.

### 3.7.3. A hipotalamusz

A hipotalamusz a talamusz alatt helyezkedik el. Az agy legfontosabb **vegetatív szabályozó központja**. Itt találhatók többek között a szervezet hőháztartását szabályozó hűtő és fűtőközpontok, valamint az éhség- és jóllakottság központja. Nagysejtes magvai az **oxitocin** és a **vazopresszin** nevű hormonokat termelik, míg kissejtes magvai az agyalapi mirigy hormontermelését szabályozzák. A hipotalamusz az agyalapi mirigy segítségével eljuttathatja az agy limbikus rendszeréből (lásd 3.8. fejezet) érkező információkat a hormontermelő mirigyekhez. Így közvetítésével valósul meg az **idegrendszer és a hormonrendszer kapcsolata**. A hipotalamusz segítségével lehetséges az, hogy érzelmi állapotunk változásai - a hormonrendszer közvetítésével - kihatnak belső szerveink működéseire.

### 3.8. A nagyagy

A nagyagy az emberi agy legnagyobb tömegű része. Két féltekéből áll melyeket a **kérgestest** (*corpus callosum*) köt össze. A féltekéknek van egy domború (3-9. ábra), egy belső (3-10. ábra) és egy alapi felszíne. Külső része a **szürkeállomány**, tartalmazza az idegsejtek sejttesteit, míg alatta helyezkedik el a **fehérállomány**, mely az idegsejtek velőhüvelyes axonjait foglalja magába. A fehérállományon belül találhatók még elkülönült szürkeállományú magcsoportok. Ezeket **bazális ganglionoknak** nevezzük, szerepük főleg az extrapiramidális mozgásvezérlésben van (lásd 4.2. fejezet). A nagyagy felszínén **tekervényeket** (*gyrusok*) és **barázdákat** (*sulcusok*) találhatunk, melyeknek egy része minden egyénben egyforma elhelyezkedésű, ezek négy fontosabb **lebenyre** tagolják az agyfelszínt (3-9. ábra).



3-9. ábra: A nagyagykéreg lebenyei

### 3.8.1. A nagyagy lebenyei

#### Homloklebeny (*lobus frontalis*)

A fali lebenytől egy árok, a **sulcus centralis**, választja el. Leghátsó régiója a **primer motoros kéreg** (*gyrus praecentralis*), mely az akaratlagos mozgásvezérlés legfőbb központja (lásd 4.1. fejezet). E terület része a bal agyféltekében a **Broca-área**, mely a beszéd és az írás mozgató központja. Elülső régiójában található az agy egyik legfontosabb asszociációs működésű régiója a **prefrontális kéreg (PFC)**, mely az érzetek kialakulásában, a tanulásban és a személyiség kialakításában fontos (lásd még a limbikus rendszernél, 3.10. fejezet).

#### Fali lebeny (*lobus parietalis*)

A sulcus centralistól hátrafelé helyezkedik el. Elülső része az **elsődleges érzőkéreg** (*gyrus postcentralis*), mely a bőreredetű érzékelés központja.

#### Halánték-lebeny (*lobus temporalis*)

A halántékcsont mögött a **Sylvius-hasadék** alatt helyezkedik el. Többek között a **hallóinformációk** feldolgozását végzi, ill. általában e területek mellett található a bal féltekében a beszédértő központ, vagy más néven a **Wernicke-área**. Emellett a

halántéklebeny része az egyik legősibb agykéregterület a **hippokampusz** (3-10. ábra), mely a hosszú távú memória kialakulásában vesz részt (lásd 6.4. fejezet), és egyben a leggyakoribb epilepszia gócpont.

### Nyakszirtlebeny (*lobus occipitalis*)

A nyakszirtlebeny a nagyagy hátsó része, mely a **látóinformációk** feldolgozását végzi.

#### 3.8.2. Az agykéreg felépítése

Az agykéreg 52 areára (Brodmann 1-52) lehet felosztani, melyek a rétegek számában, belső szerkezetükben különböznek. Megkülönböztetjük az ősi kéregtípust, az úgynevezett **paleocortexet**. Ilyen például a hippokampusz. A másik típushoz a **neocortex** tartozik, mely hat rétegből épül fel, melyek a következők:

- **molekuláris réteg** (*stratum moleculare*): idegrostokat és szinapszisokat tartalmaz,
- **külső szemcsés réteg** (*stratum granulosum externum*): kisméretű idegsejtek találhatóak itt,
- **kis piramis sejtek réteg** (*stratum pyramidale externum*),
- **belső szemcsés réteg** (*stratum granulosum internum*): kisméretű idegsejtek találhatóak itt,
- **nagy piramis sejtek réteg** (*stratum pyramidale internum*),
- **plexiform réteg** (*stratum multiforme*): változó alakú és méretű sejtek.

Az agykéreg működési egységei **oszlopokba (modul)** rendeződnek. Egy-egy modul kb. 200-300 µm átmérőjű, 2.5-3 mm magas, mely magába foglalja az agykéreg valamennyi rétegét. Egy modulhoz nagyjából 5000 sejt tartozik. A humán nagyagy általában 2 millió modult tartalmaz (patkány: 1000, majmok: 1 millió), illetve egy modul kb. 100-200 másikkal tart kapcsolatot. Minden modulba kétféle afferens érkezik. A **specifikus afferensek** az érzékszervek felől, de már kellőképpen átdolgozott információt szállítanak. A **nem specifikus afferensek** más kérgi modulokból (*corticocorticalis afferensek*) a már feldolgozott ingerületet hozzák. A kimenetek (*efferens rostok*) vagy **projekciós rostok**

lehetnek, melyek elhagyják az agykérget, vagy **asszociációs rostok**, melyek más modulokhoz szállítanak ingerületet.

Az érzékszervek felől az érzőpályákon érkező rostok, az ún. specifikus afferensek szigorúan a IV. rétegben ágazódnak el. Az itt található sejtek axonja a felületes rétegben szinaptizál a piramissejtek csúcsi dendritjével. A piramissejtek axonjai a kimenetet képviselik. A más modulokból érkező corticocorticalis afferens a kérgi henger tengelyében halad és ágazódik el, közvetlenül végződik a piramissejteken. Az információfeldolgozás a látszólagosnál bonyolultabb a gátló és serkentő interneuronoknak köszönhetően.

### **3.9. Az agyidegek**

Az agyidegeket **érző-, mozgató- és kevert agyidegek** szerint csoportosíthatjuk.

#### **3.9.1. Tisztán érző agyidegek**

##### **I. Szaglóiideg (*nervus olfactorius*)**

A felső orrkagylóban található primer érzékhámsejtek nyúlványai adják. Az érzékhámsejtek axonjai bejutnak a koponyába (*lamina cribrosa* területén) és a *bulbus olfactorius*ban végződnek, ahol más sejtekkel ún. glomerulusokat alkotnak. Az innen kiinduló másodlagos neuronok hosszú nyúlványai a *tractus olfactorius* adják, amelyek az agykéreg alsó frontális részéhez, illetve a limbikus rendszer területeire projiciálnak.

##### **II. Látóideg (*nervus opticus*)**

A retinában található dúcsejtek axonjai alkotják az ideget, melyek a *chiasma opticum* területén féligátkereszteződnek (*hemidecussatio*). A keresztesződésük után, mint látópálya (*tractus opticus*) fut a talamusz CGL (*corpus geniculatum laterale*) magjához, és ott átkapcsolódnak. Az innen kiinduló rostok az elsődleges látókéregbe (Brodmann 17) futnak.

##### **VIII. Halló- és egyensúlyozó ideg (*nervus vestibulocochlearis*)**

Az agyideg rostjai egyrészt az egyensúlyozó szervből (lásd 5.3. fejezet), másrészt a Corti-féle szervből (lásd 5.2. fejezet) indulnak ki. Az innen jövő ingerületet a dúcsejtek (*ganglion vestibulare és ganglion spirale*) veszik át, melyek a koponya üregébe lépve a megfelelő magokhoz (pl. Deiters mag, nucleus cochlearis) futnak.

### **3.9.2. Tisztán motoros agyidegek**

#### **III. Közös szemmozgató ideg (*nervus oculomotorius*)**

A középagyból induló ideg, mely a szem mozgásait biztosító finom szemizmokat idegzi be.

#### **IV. Sodorideg (*nervus trochlearis*)**

A sodorideg nagyon vékony, hosszú lefutású agyideg, mely az agytörzs hátsó oldalán lép ki. Kilépése után kereszteződik, majd előrefut a koponyagödörben és a szemüregbe lép. Az ideg a szemgolyó felső ferde izmát (*m. obliquus superior*) idegzi be.

#### **VI. Távolító ideg (*nervus abducens*)**

Az ideg motoros magja a nyúltvelőben található, innen kilépve fut a szemüregbe, ahol a felső szemgödri hasadékon keresztül lép be. A motoros ideg az oldalsó egyenes szemizmot idegzi be.

#### **XI. Járulékos ideg (*nervus accessorius*)**

A tisztán motoros ideg a nyúltvelőből lép ki, és feladata a trapéz- és fejbiccentő izmok, valamint a lágyszájpad, garat és gége izmainak beidegzése.

#### **XII. Nyelv alatti ideg (*nervus hypoglossus*)**

A nyúltvelőből eredő mozgató ideg a nyelv izomzatának mozgató beidegzésére, a nyelv alakjának változására szolgál.

### **3.9.3. Kevert agyidegek**

#### **V. Háromosztatú ideg (*nervus trigeminus*)**

A kevert agyideg a fej legnagyobb részének érző idege, érzőrostjai részt vesz a fájdalom, hő, nyomás érzékelésében. Motoros rostjai egyebek között szerepet játszanak a rágóizmoknak a beidegzésében.

## **VII. Arcideg (*nervus facialis*)**

Több funkcióval rendelkező kevert agyideg. A nyelv elülső kétharmadának specifikus érző idegellátását biztosítja. Beidegzi az arc mimikai izomzatát, a fül izmait, a platysmát. Paraszimpatikusan beidegzi az állkapocs alatti mirigyet (*glandula submandibularis*) és a nyelv alatti mirigyet (*glandula sublingualis*), valamint a könnymirigyet (*glandula lacrimalis*) egyaránt.

## **IX. Nyelv-garat ideg (*nervus glossopharyngeus*)**

Fő motoros magja a nyúltvelőben helyezkedik el, ahol a bolygóideg (X. agyideg, *nervus vagus*) magjával közösen ered. Paraszimpatikus rostjai a fültőmirigyet (*glandula parotis*) idegzik be. Érzőrostjai általános érzéseket, valamint ízérzéseket közvetítenek. A közös fejverőér (*arteria carotis communis*) elágazódásánál található nyomásérzékelő receptorból jövő ingerületet is szállítja, így szerepet játszik az artériás vérnyomás szabályozásában,

## **X. Bolygóideg (*nervus vagus*)**

A legnagyobb paraszimpatikus ideg, mely beidegzi a mellüreg és hasüreg szerveit egyaránt. Motoros magja, mely a nyúltvelő agytörzsi hálózatos állományában található, ellátja a garatfűző izmokat, és a gége belső izmait. Érzőingerületet a nyelőcső, a hörgők, valamint a szív felől szállít.

\*Érdekesség: Kutatásokkal sikerült bizonyítani, hogy a Parkinson-kór egyik oka a bélrendszerre tehető, és ennek közvetítésében a bolygóideg szerepet játszhat. Kimutatták, hogy azoknál a betegeknél, akiknek a bolygóidegét a gyomorfekély kezelése érdekében átvágták (vagotómia), azok a páciensek védelmet nyertek a Parkinson-kór ellen.

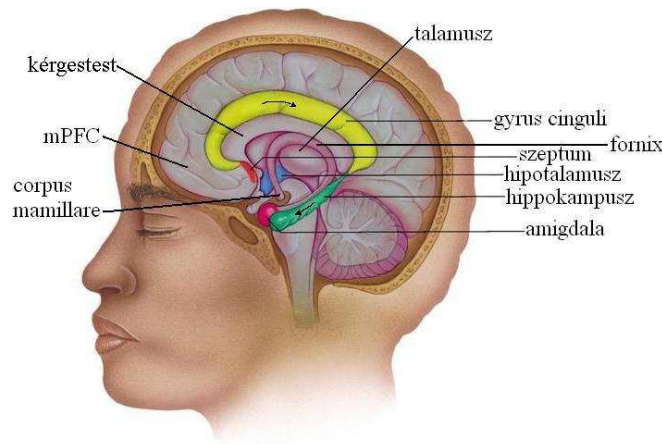


### 3.10. A limbikus rendszer

#### 3.10.1. A Papez-kör

1937-ben James Papez írt le először egy funkcionális kört, mely magában foglalja a nagyagykéreg belső felszínének, a kérgestest körül elhelyezkedő részeit, illetve a talamuszt és a hippokampuszt. Akkoriban ezt **szaglóagynak** nevezték el (rhinencephalon) és feltételezték, hogy a szaglóinformációk feldolgozásában játszik szerepet. Ma már tudjuk, hogy a Papez-kör és egyéb agyterületek együttesen, az ún. limbikus rendszert alkotva az **érzelmeink** legfontosabb agyi központjai. A Papez-körön kívül a limbikus rendszer részének tekinthetjük az **amigdalát**, a harag, düh és a félelem központját, valamint a **hipotalamusz** egyes régióit is.

A 3-10. ábrán nyomon követhetjük a Papez-körben az információáramlás irányát: **gyrus cinguli → hippokampusz → fornix → corpus mamillare → →talamusz → gyrus cinguli.**



3-10. ábra: A limbikus rendszer a Papez-körrel

#### 3.10.2. A „szociális agy” és az emberi evolúció

A prefrontális agykéreg középső része (mediális prefrontális kéreg, **mPFC**) és a limbikus rendszer, a **szeptumon** keresztül szoros kapcsolatban áll egymással (3-10. ábra). Kettejük működése együttesen nagy hatással van az ember szociális magatartására. A limbikus rendszeren belül az mPFC az **amigdalával** van kapcsolatban, kettejük együttes

működését nevezzük „**szociális agynak**”. Az emberben különösen nagy méretűvé vált mPFC, **gátló** bemeneteket szolgáltatva a limbikus rendszer felé feltételezhetően szerepet játszik érzelmeink „kordában tartásában”. Egyes elméletek szerint, ez a kölcsönhatás tette lehetővé a **társadalomalkotást** az emberi evolúcióban, mivel lehetőséget adott az emberek közötti kooperációra azáltal, hogy az egymás közötti **agressziót lecsökkentette**.

Valószínűsíthető az is, hogy az emberi evolúció egyik kulcsfontosságú lépése, a tűz megszelídítése is annak volt köszönhető, hogy a megnövekedett nagyságú mPFC le tudta gátolni az amigdalából érkező félelem-információkat. A félelmek legyőzésére az élővilágban szinte csak az ember képes. A fejlődő kooperatív magatartás, aztán az eszközhasználat és a kommunikáció fejlődéséhez vezetett, mely a nyelv kialakulását segítette elő.

\*Kiegészítés: Egyes kórképek kialakulásának magyarázata lehet szintén az mPFC-amigdala kettősének eltorzult működése. Ha az mPFC válik dominánssá, akkor az értelmi intelligencia erősödhet, mialatt az érzelmi intelligencia gyengül, ez lehet az autizmus tüneteinek egyik indoka. Ezzel ellentétben, ha az amigdala válik dominánssá, akkor az érzelmi intelligencia fokozódik, az ilyen emberek nagy szociális érzékenységgel rendelkezhetnek. Annak ellenére, hogy esetleg értelmi intelligenciájuk nem éri el az átlagot. Szélsőséges esetben ilyen lehet a Williams-szindróma. Az ebben szenvedő gyerekek - „mindenki kedvencei” - könnyen alakítanak ki kapcsolatokat, nagyon nyitottak, mozgásszabályozásuk nem megfelelő, és kevesen tudnak közülük megtanulni írni vagy olvasni.

### 3.11. Vegetatív idegrendszer

A vegetatív idegrendszer **belső szerveink** működésének, központi idegrendszertől viszonylag független (autonóm) szabályozását végzi. Működése akaratlagosan kevésbé befolyásolható. A három fő szabályozó rendszer (4-1. ábra) közül, a szomatikus idegrendszernél (érzőműködések, mozgatóműködések) lassabb, a hormonrendszernél viszont gyorsabb regulációt végez. Egy vegetatív szabályozási ciklus ideje percekben, órákban mérhető. A vegetatív idegrostok lefutására általánosan jellemző, hogy a központi idegrendszerből kilépő axonok (**preganglionáris** rostok) a célszerv előtt, még egyszer átkapcsolnak valamely perifériás **vegetatív dúcban**. Az innen kiinduló

(**posztganglionáris**) rostok idegzik be a belső szervet. A posztganglionáris rost mindig velőhüvely nélküli axon, melyen sok gyöngyfüzérszerű megvastagodás (**varikozitás**) helyezkedik el. A neurotranszmitterek ezekből ürülnek ki és viszonylag lassan, **diffúzió**val jutnak el a célszerv receptoraihoz, ahol serkentő vagy gátló hatást fejthetnek ki.

### 3.11.1. Paraszimpatikus idegrendszer

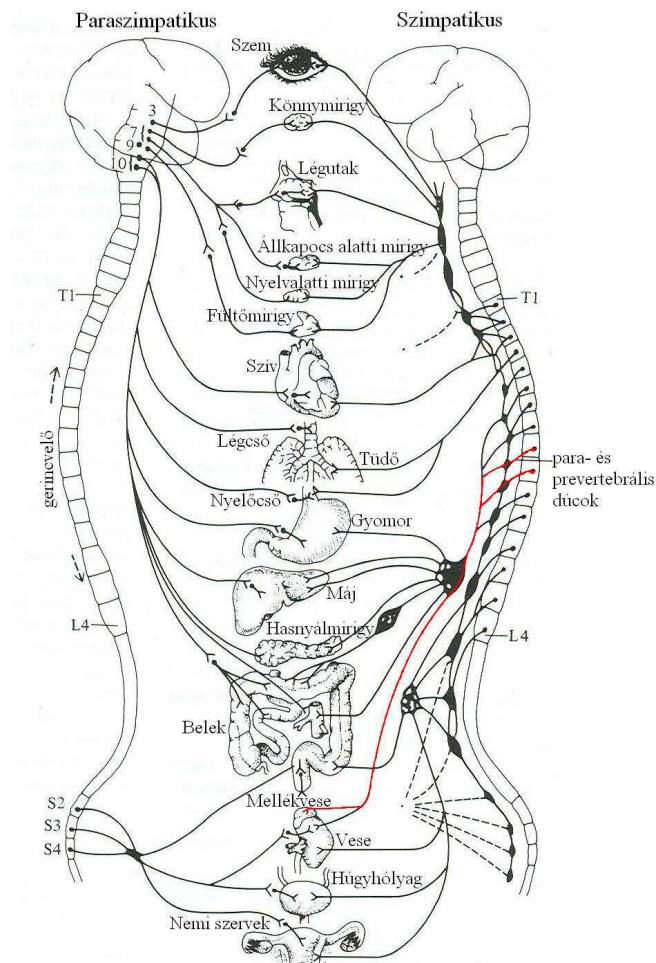
Anatómiailag a paraszimpatikus rostok az **agytörzsből** (III., VII., IX., X. agyidegek), ill. a gerincvelő **keresztcsonti** szakaszából, mint gerincvelői idegek lépnek ki. Mivel perifériás vegetatív dúcaik a gerincvelőtől távol, közvetlenül a beidegzett szerv előtt helyezkednek el, preganglionáris rostjaik hosszúak, behálózják az egész testüreget (3-11. ábra). Jellemző ingerületátvivő anyaguk az **acetilkolin** (ACh), mely a vegetatív dúcok idegsejtjein nikotin-típusú- (nAChR), míg a célszerveken muszkarin típusú acetilkolin-receptorokhoz (mAChR) kötődik.

A paraszimpatikus idegrendszer akkor aktiválódik, ha a szervezet pihen, feltölti tartalékait, regenerálódik, leginkább az étkezés utáni **ellazult állapottal** példázható. Ennek megfelelően ilyenkor a sejtekre a felépítő anyagcsere folyamatok (**asszimiláció**) túlsúlya jellemző. A légzés- és szívfrekvencia lassul, a vérnyomás csökken, a bőrerek kitágulnak. A vér nagy része a belekbe áramlik, segítve ezzel a tápanyagok emésztését és felszívását. A pupilla szűkül. A magasabb rendű központi idegrendszeri funkciók (tanulás, figyelem) csökkent hatékonysággal működnek, az agyműködésre is a pihenő állapot jellemző, szinkronizáltabb idegsejt működéssel, valamint alacsonyabb frekvenciájú EEG-vel.

### 3.11.2. Szimpatikus idegrendszer

A szimpatikus preganglionáris rostok a gerincvelő **háti**, illetve **ágyéki** szakaszából lépnek ki, és a gerincvelőhöz közel elhelyezkedő szimpatikus dúcokban (para-és prevertebrális dúcok) kapcsolnak át, ezáltal rövidebbek, mint a paraszimpatikus preganglionáris axonok. Az innen kiinduló hosszabb posztganglionáris rostok szintén velőtlenek és varikozításokban végződnek, a beidegzett szervek közelében. Jellemző neurotranszmitterük a **noradrenalin**. Beidegzés szempontjából kivételt képez a mellékvese velőállománya, mely közvetlen (preganglionáris) idegi bemenetet kap. Az

ideg a vertebrális dúcokon áthalad ugyan, de ott nem szinaptizál, posztganglionáris rost nincs. Paraszimpatikus beidegzése nincs. A közvetlen beidegzés szerepe az információátadás gyorsítása, így vészreakciókban (támadás, menekülés, stressz) gyorsabban ürülhet a mellékvesevelőben termelődő adrenalin és a noradrenalin a vérbe, melynek segítségével az élőlény hamarabb reagálhat a fenyegető ingerre (3-11. ábra).



3-11. ábra: A vegetatív idegrendszer felépítése

**Pirossal** a mellékvesevelő direkt, szinapszis nélküli szimpatikus beidegzése látható  
Rövidítések: T: thorakális (háti) szegmens, L: lumbális (ágyéki) szegmens, S: szakrális (keresztcsonti) szegmens

/Forrás: Withers, Comparative animal physiology, 1992./

Szimpatikus aktiváció általában akkor következik be, ha a szervezet felkészül valamilyen feladat megoldására, ha veszélyesnek ítélt szituációba kerül, vagy ha valamilyen **stressz**nek van kitéve. Ilyenkor a sejteknek több energiára van szükségük, ezért a lebontó anyagcserefolyamatok (**disszimiláció**) aktiválódnak, melyek során a tartaléktápanyagok lebomlanak, nő a vércukorszint és a sejtekben ATP keletkezik. Több oxigénre van szükség, ezért nő a vérnyomás, fokozódik a szívritmus és a légzésfrekvencia. A bőrrerek szűkülnek, míg a pupilla tágul. Mivel az emésztésre ilyenkor nem jut felesleges energia, a belek vérellátása és motorikája csökken, az emésztés gátolt. Az agy szimpatikus aktivációkor éberebb, az EEG-t magas frekvenciájú jelek jellemzik, bonyolult deszinkronizált neuronműködés figyelhető meg. A tanulási folyamatok és az emléknymképződés hatékonysága rövidtávon javul, de krónikusan sokáig fennálló szimpatikus aktivációban (stressz) romolhat. A fiziológiás kézremegés, a vérnyomás emelkedés és az izomtónus erősödése miatt fokozódhat.

### **3.11.3. Szimpatikus vagy paraszimpatikus tónust fokozó szerek**

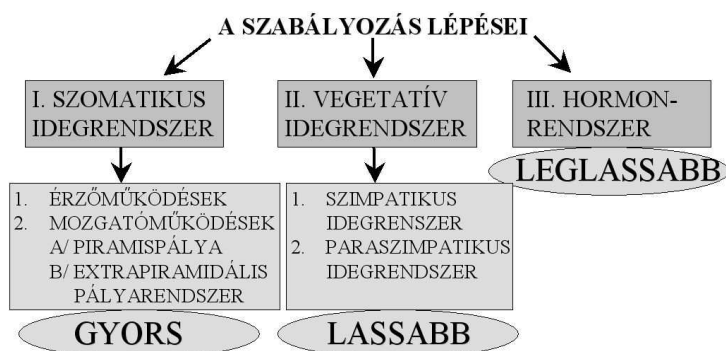
A **paraszimpatikus aktivátorok** közé tartoznak az opiátok (ópium, morfin, heroin).

**Szimpatikus aktivátorok:** koffein (kávé), teofillin (tea), teobromin (kakaó, csokoládé), atropin (nadrágulya), ide sorolhatók még az amfetamin-származékok (MDMA, ecstasy, speed) és a kokain, ill. az LSD és a meszkalin is.

A **nikotin és az alkohol** hatása összetettebb. A nikotin egyszerre viselkedhet paraszimpatikus és szimpatikus stimulánsként, míg a kis mennyiségű alkohol (pl. 1dl bor) paraszimpatikus hatást, a nagyobb mennyiségű alkohol pedig szimpatikus hatást vált ki. Mindezen szimpatikus vagy paraszimpatikus tónust befolyásoló szerek, nagymértékben képesek változtatni a szervezet mozgásszabályozó központjait.

## 4. Az idegrendszer akaratlagos mozgatóműködései

A szervezet szabályozóműködéseinek három lépése közül a **szomatikus idegrendszer** (érzőműködések és mozgatóműködések) a **leggyorsabb**. Gyorsabb szabályozást tesz lehetővé, mint a vegetatív idegrendszer vagy a hormonrendszer (4-1. ábra).



4-1. ábra: A szervezet szabályozó működéseinek szintjei

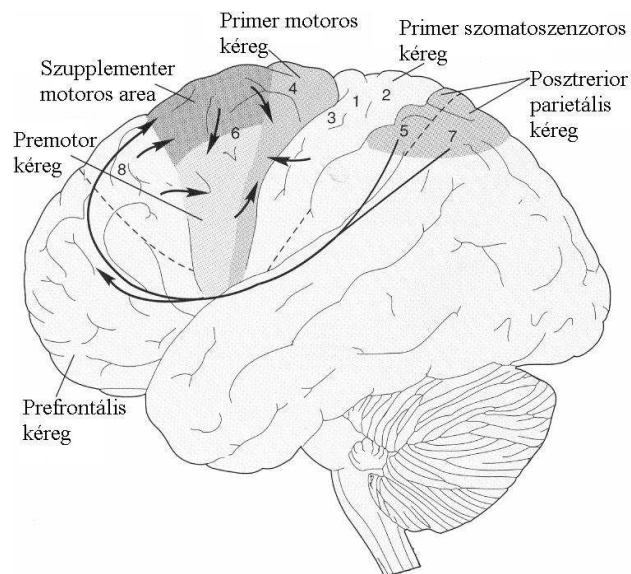
A szomatikus idegrendszeren belül a mozgatóműködések (szomatomotoros idegrendszer) a vázizmok vezérlését végzik. Lehetnek egyrészt **automatikusak**: ilyenek a reflexek (lásd 3.4. fejezet) és a testtartás szabályozása (lásd 6.1. fejezet), vagy **akaratlagosak**. Az akaratlagos mozgatóműködések két csoportba oszthatjuk: **piramis-** és **extrapiramidális** pályarendszerre. A piramispálya főleg az agykérgi mechanizmusokért felelős, míg az extrapiramidális hálózat alatt főleg a **bazális ganglionok** és a **hurokpályák** működéseit értjük. Valójában azonban tudnunk kell, hogy a két nagy mozgató mechanizmus szorosan együttműködik a mozgások kivitelezésében, tevékenységük nem szétválasztható. Ennek ellenére máig szokás külön tárgyalni a két rendszert a könnyebb érthetőség kedvéért. Mégis tartsuk szem előtt, hogy minden mozdulat kivitelezésében is részt vesz mind a piramis-, mind az extrapiramidális pályarendszer.

#### 4.1. A piramispálya mozgásvezérlése

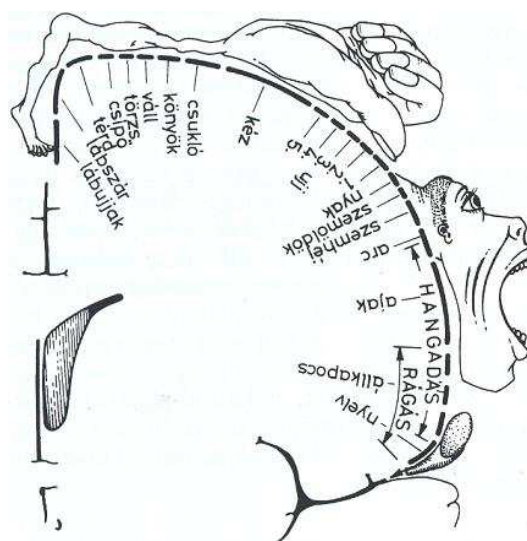
A piramispálya elsődleges szerepe az **akaratlagos, gyors, pontos, nem betanult** mozdulatok kivitelezése. **Kortikospinális pályának** is nevezik mivel az agykéregből, a gerincvelő, majd az izmok felé halad az információ. A piramispálya a nagyagykéreg **homloklebenyéből** indul ki, lefelé haladó útja során az axonok 90%-a **átkereszteződik** a test másik oldalára a **nyúltvelői piramisban**, míg 10%-a átkereszteződés nélkül, az azonos oldali fehérállományban halad lefelé, majd csak közvetlenül a gerincvelőből kilépés előtt, a megfelelő gerincvelői szegmensnél kereszteződik át. Így végső soron mindkét pálya átkereszteződik, és az egyik oldali testfél összes vázizma, az ellenoldali agyféltekéből kap akaratlagos mozgató parancsot. A pálya az agykéregtől az izomig mindössze két idegsejtből áll: az agykérgi piramis sejtből, melynek axonja igen hosszú és átkapcsolás nélkül halad egészen a gerincvelő megfelelő szegmenséig, ill. az általa beidegzett  **$\alpha$ -motoneuronból**, mely a gerincvelőből kilépve eléri a mozgatni kívánt izmot. Minden, az izom összehúzódására ható idegi befolyás – így a piramispálya is -, a motoneuronokon keresztül jut el az izmokhoz, ezért a motoros neuronokat és az efferens axonokat **közös végső pályának** nevezzük.

##### 4.1.1. Primer motoros kéreg

Az agykéreg legkevesebb négy régiója vesz részt a piramispálya mozgásszervezésében (4-2. ábra). A legfontosabb a homloklebeny leghátsó részén, közvetlenül az elsődleges érzőkéreg előtt elhelyezkedő primer motoros kéreg (Brodmann 4), melyből a kortikospinális pálya axonjainak mintegy fele indul ki. A primer motoros kéreg **szomatotópiás** vetülésű, mely szerint a test izmainak helye meghatározott az agykérgen is. Egy ún. **motoros homunculus** (emberke) vetíthető rá, melyen az is megfigyelhető, hogy a finomabban, precízebben mozgatható, kisebb izmok (kéz, ajkak) beidegzésének nagyobb terület jut az agykérgen is (4-3. ábra). A megfelelő pontokon ingerelve a primer motoros agykérget izommozgás váltható ki, ill. bizonyos sérülései az ott reprezentált izmok működésének kiesésével járhatnak.



4-2. ábra: A mozgásvezérlés akaratlagos irányításának agykérgi központjai



4-3. ábra: A motoros homunculus

/Forrás: Fonyó és Ligeti, Az orvosi élettan tankönyve, 2008., 640. oldal, 42-10. ábra alapján/



#### 4.1.2. Premotor kéreg

A primer motoros kéreg előtt helyezkedik el a premotor kéreg (Brodmann 6), melynek középső részét szupplemeter motoros areának nevezzük. A premotor kéreg a **mozgástervezésben** fontos, körülbelül 0,8 másodperccel a primer motoros kéreg aktiválódása előtt jön ingerületbe. Mérete az embernél különösen nagy. Axonjainak egy része a kortikospinális pályát alkotja, másik része pedig a primer motoros kéregbe fut, és annak működését szabályozza. Sérülése esetén főleg a kéz bonyolult izmait irányító összetett mozgásmintázatok sérülnek (írás, fésülködés, fogmosás stb.), az ilyen sérüléseket **apraxiáknak** nevezzük.

#### 4.1.3. Szupplemeter motoros área

A szupplemeter motoros área szerepe szintén a **mozgástervezés**, ám ez a legfontosabb olyan agyterület, amely akkor is aktiválódik, ha a mozgulatsort nem végezzük el, hanem csupán rágondolunk. Sérülése esetén a **még bonyolultabb**, általában **két kezet igénylő** mozgások képessége romolhat.

#### 4.1.4. Poszterior parietális agykéreg

Megemlíthetjük még a poszterior parietális agykérget (Brodmann 5,7), mely a fali lebeny hátsó részén helyezkedik el és szintén fontos szerepe lehet bizonyos mozgások irányításában. Ez a kéregterület főleg akkor aktiválódik, ha az adott mozgásban bonyolult **térérzékelési** feladatok vannak (finom, pontos mozdulatok), illetve akkor, ha a cselekedet erősen **motivált**, pl. ha a mozdulat véghezvitele valamilyen jutalmat eredményez. Emellett a poszterior parietális agykéreg bal féltekei része „beleszólhat” a **Wernicke és Broca** areák által szabályozott beszédértő és beszédmozgató központok működésébe is. A szupplemeter motoros areához hasonlóan gyakran innen is elvezethető ingerület csupán a mozdulatra gondolás esetén is. A poszterior parietális kéreg sérülései hasonló apraxiákat okoznak, mint a premotor kéreg defektusai.

#### 4.2. Az extrapiramidális mozgásvezérlés

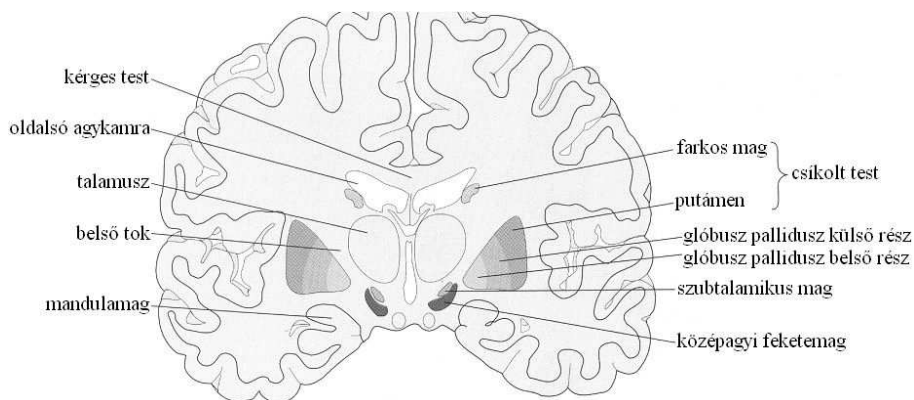
Az extrapiramidális pályarendszer a piramispálya mozgásvezérlésével ellentétben kevésbé akaratlagos, kevésbé tudatos. Ennek megfelelően a **durvább, elnagyoltabb, betanult** mozdulatok kivitelezését irányítja. Ez azonban csak részben igaz. Valójában a

piramispálya és az extrapiramidális pályarendszer együttesen vesznek részt minden mozgás kivitelezésében. Pl. egy „o” betű megformálásánál nem kell tudatosan arra gondolnunk, hogy egy kört kell rajzolni, mert ezt a mozgásparancsot már gyermekkorunkban megtanultuk és az extrapiramidális pályarendszer automatikusan, tudatos parancs nélkül elvégzi. Viszont a változó tényezőket (a papír mely részére írjuk, mekkora nagyságú lesz a betű stb.) mindig tudatosan döntjük el, és a piramispálya vezérli. Az írás megtanulása során azért megy nehezen és lassan minden egyes betű leírása, mert ilyenkor még nincs extrapiramidális automatizmus, és mindent tudatosan kell irányítanunk kizárólag a piramispálya igénybevételével.

Az extrapiramidális pályarendszer legfőbb kiinduló pontjai az **agytörzs**, a **kisagy** és a **bazális ganglionok**. Az agytörzsi magvak és az agytörzsi hálózatos állomány főleg a testtartás kialakításában, a nyak és a szem reflexes mozgásában vesznek részt (lásd. 6.1. fejezet). A kisagy a betanult mozgások rögzítésével, az egyensúlyérzékeléssel, és a mozgás kivitelezés szabályozásával foglalkozik (lásd 3.6. fejezet). A bazális ganglionok az ún. hurokpályák segítségével az agy többi részét is bevonják a mozgások szabályozásába. Ezáltal a különböző **érzetek** az asszociációs agykéregterületekből és az **érzelme**k a limbikus rendszerből érkező szintén befolyást gyakorolhatnak a mozgásszervezésre. A **hurokpályák** a **talamusz** „zárása” vagy „nyitása” által szabályozzák azt, hogy a bazális ganglionokból érkező információk hányadrésze jusson el a premotor kéregbe és így az extrapiramidális mozgásparancsok milyen arányban jelenjenek meg a végső mozdulatsorban.

#### 4.2.1. Bazális ganglionok

A bazális ganglionok (4-4. ábra) az agykéreg alatti fehérállományban elhelyezkedő sejtcsoportok. Törzsdúcoknak is szokták őket nevezni, bár a törzsdúcok közé sorolhatunk egyéb agytörzsi magvakat is. Szervezettségük és kapcsolatrendszerük igen bonyolult, funkciójuk a mai napig nem teljesen tisztázott.



4-4. ábra: Bazális ganglionok.

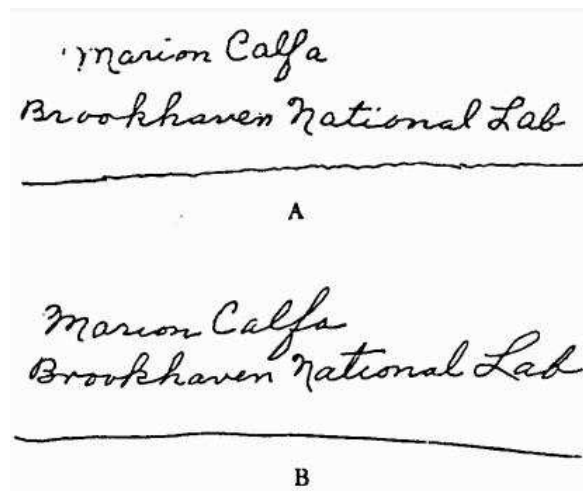
Tudományos nevek: farkos mag-nucleus caudatus; csíkolt test-striátum; közepagyi feketemag-substantia nigra; kérgestest-corpus callosum; belső tok-capsula interna; mandulamag-amygdala

A bazális ganglionokat a jobb oldalon láthatjuk felsorolva, úgymint: a **farkos mag** (*nucleus caudatus*) és az alatta elhelyezkedő **putámen** alkotta **csíkolt test** (*striatum*). A háromszög keresztmetszetű **lencsemag** (*nucleus lentiformis*), melynek legkülső része az előbb említett putámen, belső része pedig a **glóbusz pallidusz**, mely szintén két részre bontható, egy külső és egy belső szegmensre. Ide tartozik még a thalamusz alatt elhelyezkedő **szubthalamikus mag** (*nucleus subthalamicus*) és végül a **közepagyi feketemag** (*substantia nigra*), melyet gyakran csak a törzsdúcok közé sorolnak, a bazális ganglionok közé nem. A thalamusz „zárását” a vele kapcsolatban álló, és neki gátló bemenetet adó glóbusz pallidusz belső része és a közepagyi feketemag együttesen valósíthatja meg. A többi bazális ganglion ez utóbbi kettő működését befolyásolja.

#### 4.2.2. Talamusz „nyitás” (közvetlen út)

A különböző agykéregterületekről - beleértve a mozgástervezésben jelentős premotor kérget - a bazális ganglionokba érkező információ serkenti a csíkolt test idegsejtjeit (farkos mag, putámen). A csíkolt test ebből kifolyólag erősebb gátló hatást fejt ki a glóbusz pallidusz belső részére és a közepagyi feketemagra. Ez utóbbi kettő thalamusra kifejtett gátló hatása ezáltal gyengül, és a thalamusz „nyílik” a premotor kéreg felé (4-6. ábra). Ezt a jelenséget, mikor két gátló idegi elem követi egymást és az első blokkolja a második gátló hatását, diszinhibíciónak vagy **gátlásoldásnak** nevezzük. A

„nyitott” talamusz több bemenetet enged a premotor kéreg felé, így **több mozgás** valósul meg. Ha ez a rendszer sérül, akkor a talamusz „zártabb” lesz **hipokinézis** vagy **akinézis** (kórosan kevés mozgás, mozgásképtelenség) áll elő, mely esetenként talamikus eredetű 5Hz-es frekvenciájú tremorral (kézremegés) is társulhat. Ez utóbbi kórkép a **Parkinson-kór** (4-5. ábra), melynek okaként elsősorban a középagy feketemag kompakt részének dopamin tartalmú sejtjeinek pusztulását jelölik meg. Ez a **nigrostriatális dopamin pálya** hibás működéséhez vezet.

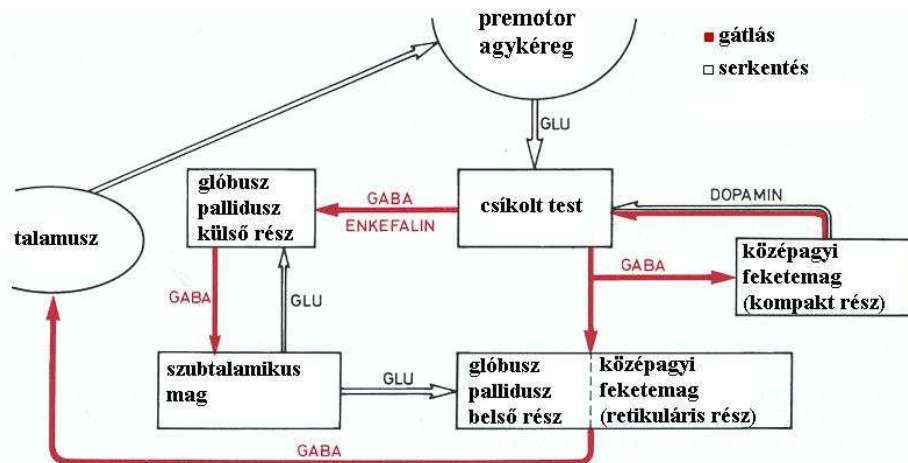


4-5. ábra: Parkinson-kóros beteg írásképe.  
A, kezelés előtt; B, gyógyszeres kezelés után

#### 4.2.3. Talamusz „zárás” (közvetett út)

A végső pálya itt is ugyanaz, azaz a glóbusz pallidusz belső része és a középagy feketemag gátolja a talamuszt, ebben az esetben azonban ez a gátlás nem csökken, hanem fokozódik, így a talamuszba több gátló bemenet fog érkezni és „zárulni” fog. A közvetett út hosszabb, mint a közvetlen. A premotor kéregből érkező információ a csíktalpusz keresztül a glóbusz pallidusz belső részébe jut és gátolja annak működését. A csökkent aktivitású glóbusz pallidusz kevésbé képes gátolni a szubtalamikus magot, így annak működése fokozódik (**gátlásoldás**). Ezáltal a szubtalamikus mag a közvetlen útnál tapasztaltakkal ellentétben a glóbusz pallidusz belső részét és a középagy feketemagot serkenti, így a talamuszra kifejtett gátló bemenet erősödik, a talamusz „zárul” (4-6. ábra). A „zárt” talamusz kevesebb információt enged a premotor kéreg felé, így **kevesebb**

**mozgás** valósul meg. Ha ez a rendszer rosszul működik, akkor a thalamusz „zárás” sérül és **hiperkinetikus** mozgások (akaratától független hirtelen mozdulatok, rángások) jönnek létre. Súlyosan kóros esetben ezt Huntington-kórnak nevezzük.



4-6. ábra: A hurokpályák

A bazális ganglionok a hurokpályák közvetítésével „nyitják” vagy „zárják” a thalamust a premotor kéreg felé, ezáltal több vagy kevesebb mozgás valósul meg

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 869. oldal, 35-28. ábra alapján/

## 5. Mozgásszabályozásban szerepet játszó legfontosabb érzékszervek működései

A látás, a hallás érzékszervi működései, fontos szerepet játszanak a mozgásszabályozásban. A helyzetérzékelés a fej- és a szemek térbeli helyzetének reflexes szabályozásához, illetve a testtartás és az izomtónus (lásd 6.1. fejezet) kialakításához feltétlenül szükséges.

### 5.1. Látás

Az állatvilág és természetesen maga az ember is a külvilágról szóló, a külvilágban történt eseményeket a látható fény feldolgozása alapján szerzi meg. A fényinger ingerületté alakítására szolgáló érzékszerv a szem. A szem a felvett jeleket továbbítja a központi feldolgozó apparátusba, az agyba.

#### 5.1.1. A szem felépítése

A szem szerkezeti felépítésnek (5-1. ábra) központjában a gömbölyű **szemgolyó** áll, melynek falát három réteg burkolja, ezek kívülről-befelé haladva a következők:

- **külső réteg**, aminek hátsó része a fehér színű **ínhártya** (*sclera*), míg elülső része az átlátszó **szaruhártya** (*cornea*). Az ínhártya felszínéhez tapadnak a szemmozgató izmok. Az embernél mindkét szemgolyót különálló izmok mozgatják, melyek a tér mindhárom irányába képesek elmozdítani,

\*Kiegészítés: Az ínhártya fehér színe a szaruhártya körül a kötőhártyán is áttűnik. Ez adja a „szem fehérét”.

- **középső réteg**, mely erekkel gazdagon átszőtt, ezzel biztosítva a szem belső nedvkeringését és a belső réteg oxigénellátását, ill. táplálását, három részből áll:
  - o hátsó 2/3-át a sötét színű **érhártya** (*choroidea*) borítja,

\*Kiegészítés: Egyes állatoknál (pl.: macska), az érhártya egy fényvisszaverő réteget (*tapetum lucidum*) tartalmaz. Ebben a rétegben található sejtek guanint tartalmaznak, mely a beeső fényt sötétben zöldesen fluoreszkálva veri vissza.

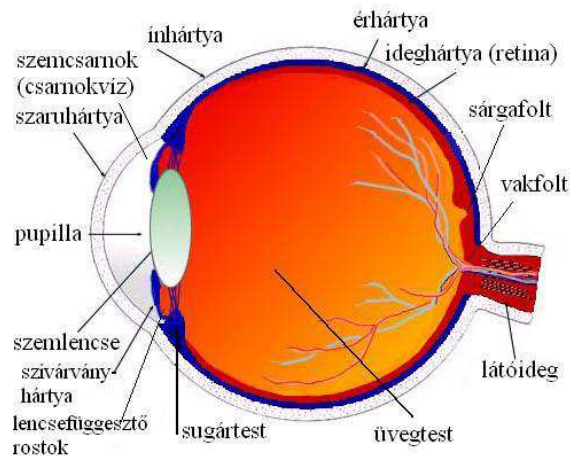
- o az érhártya előrefelé a **sugártest**ben folytatódik, ami a **csarnokvizet** termeli. A csarnokvíz víztiszta, az agy-gerincvelői folyadékhoz hasonló, mely a **szemcsarnok**okat tölti ki. A csarnokvíz elvezetése a csarnokzugon keresztül történik. Ha az elvezetés nem megfelelő, a szemben uralkodó nyomás fokozódik. A sugártest simaizom elemeket is tartalmaz, melyek **lencsefüggesztő rostok**on keresztül kapcsolódnak a rugalmas **szemlencséhez**. A lencsefüggesztő rostok a szemlencse mozgásában játszanak szerepet,
- o az érhártya elülső része a **szivárványhártya** (*iris*), melynek középső kerek része a 4mm átmérőjű **pupilla**, mely erős fény hatására összehúzódik, sötétben kitágul, így szabályozva a beengedett fény mennyiségét.

\*Kiegészítés: A szivárványhártya színét, azaz a szemszínünket, a benne található pigmentsejtek (színes sejtek) száma határozza meg. A zöld vagy kék színűekben kevés, a barna, ill. fekete színűekben sok pigmentsejt található.

- **belső réteg**, a tényleges ingerfelvevő réteg, az **ideghártya** (*retina*), mely fejlődését tekintve ugyanabból a szövetből (ektoderma) származik, mint amiből az agy fejlődik.

A retinában egyrészt fényérzékelő receptorok (csapok és pálcikák), valamint ingerületet elvezető neuronok találhatók (lásd 5.1.6. fejezet). A retinát egyrészt belülről az üvegtest, kívülről az érhártya határolja. A retinának azt a részét, ahol a látóideg a szemből kilép, **vakfolt**nak nevezzük. A neve onnan adódik, hogy ez a hely csapokat és pálcikákat nem tartalmaz, nincs fényérzékelés. Ettől oldalra (embernél körülbelül 4-5mm) található az éleslátás helye, a **sárgafolt**. A sárgafolt szerkezete eltér a retina általános szerkezetétől, mert ezen a részen kizárólag csapok találhatók.

A szemgolyó nagy részét az **üvegtest** alkotja. Az üvegtest előtt helyezkedik el a korábban már említett szemlencse, mely a szembe jutó fénysugarak szabályozásában játszik kiemelkedő szerepet.



5-1. ábra: A szem felépítésének vázlata

### 5.1.2. A szem optikai rendszere/A szem fénytörő közegei

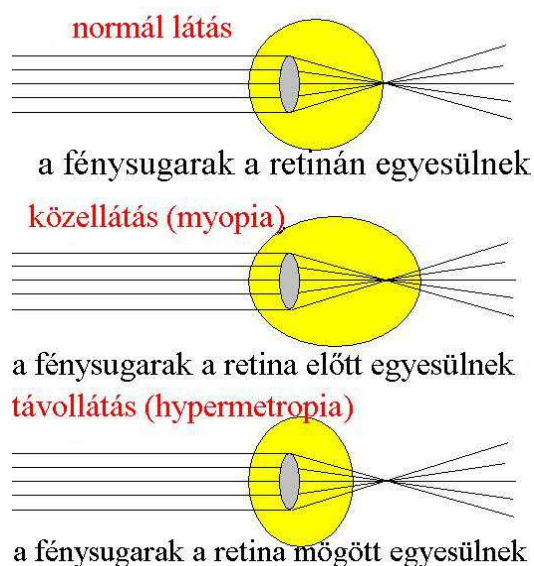
A látás elengedhetetlen feltétele, hogy a külvilágról szóló információ megjelenjen a szem ideghártyáján, a retina fényérzékelő elemein. A szem mindig a külvilág **kicsinyített, fordított állású, valódi képét** vetíti a retinára.

A szembe érkező fénysugárnak a retináig négy közegen kell keresztülhatolnia (szaruhártya, csarnokvíz, lencse, üvegtest). Először a szaruhártyán halad keresztül, ami egyúttal az első **törőközeg**. A másik nagy fénytörő rész, a pupilla mögött elhelyezkedő lencse. Az emberi szem fénytörésében a legnagyobb szerepet a szaruhártya játssza. A beeső fénysugarakat a törőközegek úgy törik meg, hogy a sugarak a retina sárgafoltján egyesüljenek (5-2. ábra/felső kép).

**Távolra nézés**kor a lencsefüggesztő rostok feszesek, a sugártest izmai elernyedtek, a lencsét viszonylag lapos állapotban tartják. **Közelre nézés**kor a sugártest izmai összehúzódnak, a lencsefüggesztő rostok feszülése csökken, a lencse rugalmasságának köszönhetően domborúbb lesz. Ezt a folyamatot, amikor a szem alkalmazkodik a különböző távolságokhoz, **akkomodációnak** nevezzük. Nagyságát **dioptriában (D)** adhatjuk meg.

Már fiatal korban is előfordulhat, hogy a beérkező fénysugarak a szaruhártya megváltozott törőképesége miatt, a retina előtt (**rövidlátás, myopia**), ill. a retina mögött (**távollátás, hypermetropia**) egyesülnek (5-2. ábra/középső és alsó kép). Az előbbi szórólencsével, az utóbbi gyűjtőlencsével korrigálható.





5-2. ábra: A normál-, a rövid-, ill. a távollátás sematikus ábrája

\*Kiegészítés: A szem optikai rendszere csak abban az esetben működik kifogástalanul, ha a fő törőközegek (szaruhártya és lencse) egymástól és retinától való távolságuk állandó. Az állandó értéken tartást a szem belnyomása biztosítja. A nyomást a csarnokvíz folyamatos termelődése és felszívódása tartja állandó értéken. A termelődés és felszívódás egyensúlyának megbomlása zöldhályoghoz vezethet, ami a retina károsodásával jár. A zöldhályog elnevezés helytelen, hiszen hályog nem képződik, és a szem nem látszik zöldnek.

### 5.1.3. A látás perifériás mechanizmusa/A retina felépítése

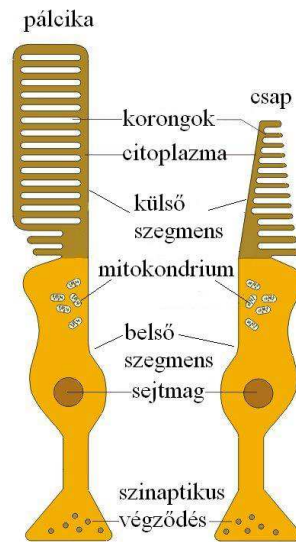
A nyugvó szem esetén a kép a retinára vetül. Embereknél „inverz” szemekről beszélhetünk, mert a fényfelfogó része a fény irányával megegyezően helyezkedik el, és csak a visszavert fénysugarakat képes felfogni. A retina réteges szerkezetű (10 réteg), melynek egyik része a pálcikák és csapok rétege. A két **fotoreceptorsejt** eltérő arányban (körülbelül 120 millió pálcika, 10 millió csap) van jelen (5-3. ábra). A hosszabb, henger alakú külső szegmenssel rendelkező **pálcikasejtek**, nagy fényérzékenységgűek. Már gyenge fény mellett is működnek. Ők felelősek a szürkületi, az ún. „szkotópiás” látásért.

A nappali látás, a „fotópiás” látás a rövidebb, kúp alakú **csapok** működéséhez kötődik. A csapok fényérzékenysége kisebb a pálcikákénál, mégis az ő működésük teszi lehetővé a színek érzékelését. Mindkét fényérzékelő sejt különböző feladatot ellátó részre tagolódik (5-3. ábra). **Külső szegmensükben** korong alakú membránrendszer figyelhető meg, melyek fényérzékeny fehérjemolekulákat, az ún. **fotopigmenteket** tartalmaznak. A **belső szegmentumban** találjuk a sejtmagot, ill. a mitokondriumot, mely a sejt anyagcsere-folyamatához elengedhetetlen. A belső szegmens a szinaptikus végződésbe megy át, itt helyezkednek el az ingerületátvivő anyagot (transzmitter) tartalmazó hólyagocskák.

#### 5.1.4. A látás perifériás mechanizmusa/A fototranszdukció

Fény hatására a fotoreceptorsejtekben fotokémiai folyamat indul meg. A pálcikák fotopigmentje a **rodopszin** (látóbíbor). A rodopszinban erős kémiai kötéssel (kovalens kötés) kapcsolódik a **retinal**, ami az **A-vitamin** származéka. A retinalmentes fehérjerészt **opszinnak** nevezzük. Ha fény éri a fotoreceptorsejtet, a retinal szerkezete megváltozik. A változás különböző folyamatokon keresztül egy nukleotid, a ciklikus guanozin-monofoszfát (cGMP) szintjét csökkenti. A cGMP szint csökkenése a látás alapvető lépése.

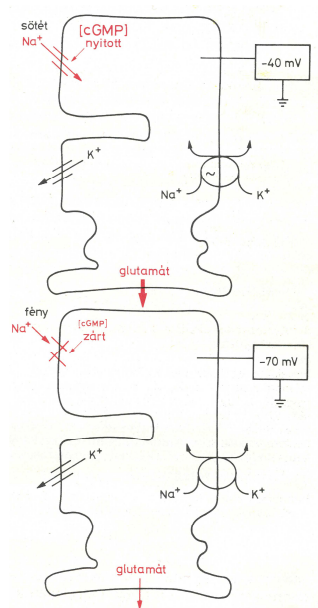
\*Kiegészítés: 1.) A kémiai reakciót követően az átalakult retinal leválik a fehérjéről és elhagyja a sejtet. A sejtől kijutott retinalt a szomszédos sejtek felveszik és A-vitaminná, majd eredeti rodopszinná alakítják. A szervezet nem képes A-vitamint előállítani. Ennek hiányában a sötétben látás képessége szűnik meg, amit „farkasvakságnak” nevezünk. 2.) A rodopszin visszaalakítása sötétben lassú, percekben mérhető folyamat. Ez az oka, hogy ha fényről a sötétbe megyünk, a látásunk (pálcikalátás) csak percek múlva áll vissza.



5-3. ábra: A fényérzékelő receptorok felépítése

#### 5.1.5. A látás perifériás mechanizmusa/A transzmitterfelszabadulás

A fotoreceptorsejtek nyugalmi membránpotenciálja sötétben pozitívabb (-40mV, 5-4. ábra), mint más idegsejtek membránpotenciálja (-70-90mV). Ez az emelkedett membránpotenciál azt jelenti, hogy **sötétben** a fotoreceptorsejtek depolarizált állapotban vannak. Ennek oka, hogy sötétben a sejt külső szegmentumában a magas **cGMP**-szint hatására nyitottak a **Na<sup>+</sup>-csatornák**. A Na<sup>+</sup> a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb felé, azaz a sejtbe áramlik, ezáltal **depolarizációt** okoz. A depolarizáció hatására a szinaptikus végződésből neurotranszmitter anyag, jelen esetben **glutamát** szabadul fel. **Fény** hatására a cGMP-szint lecsökken, a Na<sup>+</sup>-csatornák bezárulnak. Eközben a folyamatosan áramlik ki a sejtől a K<sup>+</sup>, a sejt **hiperpolarizálódik**, a potenciálkülönbség értéke eléri a -70 mV-ot. A hiperpolarizáció következtében a szinaptikus végződésből a glutamát leadása csökken.

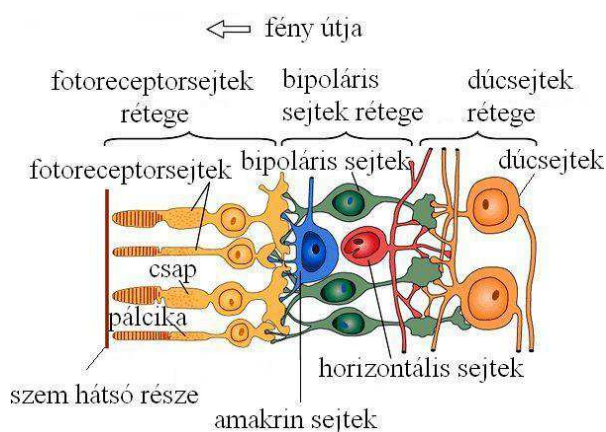


5-4. ábra: A fotoreceptor sejtek transzmitter ürítésének vázlata

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 935. oldal, 37-31. ábra alapján/

#### 5.1.6. A látás perifériás mechanizmusa/ Az ingerületterjedés iránya

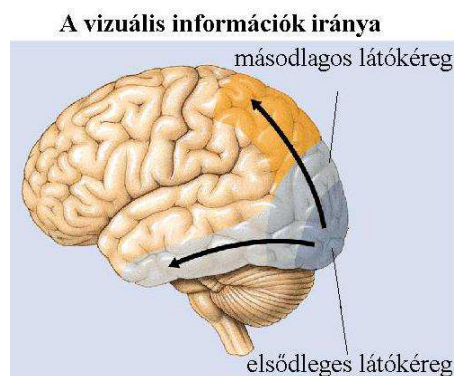
A retinában a fotoreceptorsejtek mellett különböző idegsejteket lehet elkülöníteni: **bipoláris** (kétnyúlványú), **horizontális**, **amakrin**, ill. **dúcsejteket** (5-5. ábra). A fotoreceptorsejtekről a potenciálváltozást a bipoláris idegsejtek vezetik tovább a retinában. A bipoláris idegsejtek nyúlványai a dúcsejtekhez kapcsolódnak. Ezeknek a dúcsejteknek az axonjai alkotják a **látóideget** (*nervus opticus*).



5-5. ábra: Az ingerületterjedés útja

### 5.1.7. A látás centrális mechanizmusa

A látóideg a vakfolton keresztül, a szemgolyó hátsó részén lép ki. A látóideg egy ideig változatlanul halad, majd eléri a középagyat (*chiasma opticum*), ahol egy része **átkereszteződik** (lásd 6-1. ábra). A szemidegek kereszteződése után már **látópályáról** beszélhetünk, ami a talamusz **CGL** (*corpus geniculatum laterale*) magjába viszi az ingerületet. Innen **átkapcsolódás** után az információ az **elsődleges látókéregbe** jut (Brodmann 17), ami a **nyakszirtlebenyben** található (5-6. ábra). Az elsődleges látókéregből a vizuális információ az agykéreg egyéb területeire (**másodlagos**, ill. **harmadlagos látókéreg**) is eljut. A látásélmény a kéregrészek együttműködésének eredménye.



5-6. ábra: A vizuális információk iránya a nagyagykéregben

## 5.2. Hallás

### 5.2.1. Akusztikai alapfogalmak

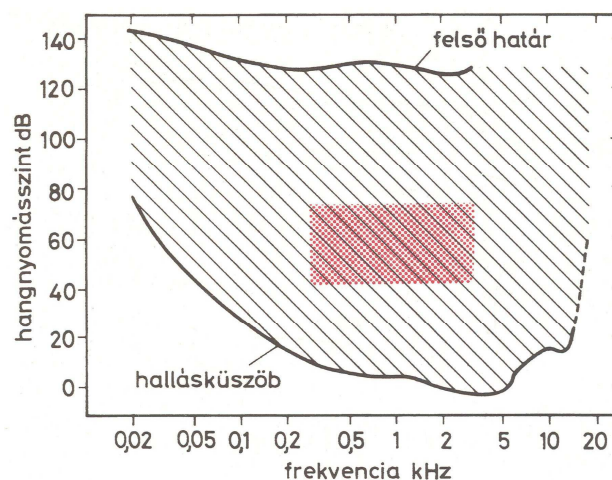
A hang a levegő **longitudinális rezgése**, azaz egymást meghatározott frekvenciával követő légsűrűsödések és légritkulások sorozata. A hangokat hangmagassággal és hangerővel szokás jellemezni. A **hangmagasság** a rezgés ciklusainak periódusidejével (hullámhossz) vagy a periódusidő reciprokával, azaz a **frekvenciával** jellemezhető, melyet Hertz-ben (Hz) szokás megadni. Az ún. **tiszta hangok** egyetlen jellemző frekvenciával írhatók le, függvényen ábrázolva szinuszgörbét adnak.

A valóságban előforduló **összetett hangok** több, ún. **harmonikussal** jellemezhetők, melyek az eredeti frekvencia egész számú többszörösei és „rátevődnek” az eredeti szinuszhullámra. Így jönnek létre az eltérő hangszínek, pl. két különböző hangszer is így szólalhat meg másféle hangon annak ellenére, hogy éppen ugyanazt a zenei hangot szolgáltatják meg. Az emberi fül a 20-20000Hz frekvenciájú hangokat képes észlelni, a 20Hz alatti frekvenciájú hangot **infrahangoknak**, míg a 20000Hz felettieket **ultrahangoknak** nevezzük. Hallószervünk az 1000-4000Hz-es tartományban a legérzékenyebb. Érdekes módon ennél kicsit alacsonyabb tartományba esnek a beszédhangok (80-1000Hz). Feltételezhetően azért, mert az evolúció során a hallás nem elsősorban a beszéd megértésére fejlődött ki.

A **hang erősségét** (hangintenzitás) a levegő rezgése miatt létrejövő nyomásváltozás nagyságával jellemezhetjük. Ez tulajdonképpen a hangot leíró szinuszfüggvény amplitúdójának nagysága. A hangerőt leggyakrabban mégsem a nyomás leírására szolgáló Pascal (Pa) fizikai mértékegységgel, hanem **decibelben** (dB) mérjük. A legfontosabb különbség a kettő között az, hogy a decibel skálán a 0dB pontban van mérhető hangnyomás. Ez 2000Hz-es frekvencián éppen a hallásküszöb értéke, tehát az a hangerő, amit egy egészséges ember még éppen meghall. Értéke:

$$0\text{db} = 2 \times 10^{-5} \text{Pa} = 20\mu\text{Pa}.$$

Ez azonban csak 2000Hz-nél érvényes, ugyanis alacsonyabb és magasabb frekvenciatartományokban fülünk kevésbé érzékeny, így a hallásküszöb értéke is egyre magasabb dB-tartományokat vesz fel (5-7. ábra).



5-7. ábra: Az emberi fül hallástartományának hangmagasság (frekvencia) és hangerő (hangnyomás) függése. **Pirossal** jelezve a legérzékenyebb tartomány

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 913. oldal, 37-10. ábra alapján/

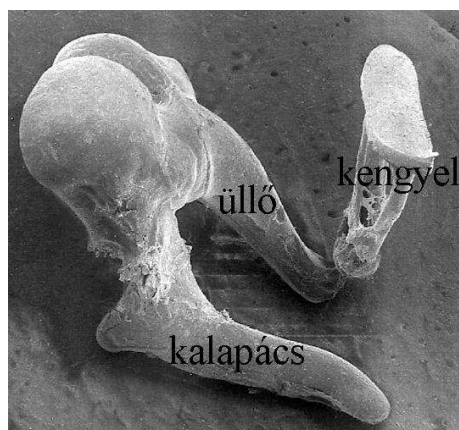
Fülünk a 40-80dB tartományokban hall a legjobban, az ennél magasabb hangintenzitás értékek már kellemetlenek, 120dB felett pedig már nem hangot, hanem fájdalmat érzünk.

### 5.2.2. A hallás perifériás mechanizmusai/A külső fül szerepe

A **fülkagyló** és a **külső hallójárat** alkotják a külső fület. **Rezonátorként** működve a levegőrezgést a dobhártyáig vezetik. A fülkagyló hangerősítő szerepe elhanyagolható, a hangirány meghatározásában játszhat inkább szerepet.

### 5.2.3. A hallás perifériás mechanizmusai/A középfül szerepe

A középfül a **dobhártyától** a belső fül **ovális ablakáig** vezeti a rezgéseket. Szerepe az, hogy megfelelő erősítést adjon ahhoz, hogy az eddig a kisebb sűrűségű levegőben könnyebben terjedő rezgés a belső fülben, mint folyadékrezgés folytathassa útját. Ezt a folyamatot **impedanciaillesztésnek** nevezzük, melyet a hallócsontocskák (5-8. ábra) végzik.



5-8. ábra: A hallócsontocskák elektronmikroszkópos képe

Megfigyelhető a kalapács „nyele” mely normálisan a dobhártyához rögzül, ill. a kengyel hosszúka talpa mely pontosan illeszkedik a csiga ovális ablakához.

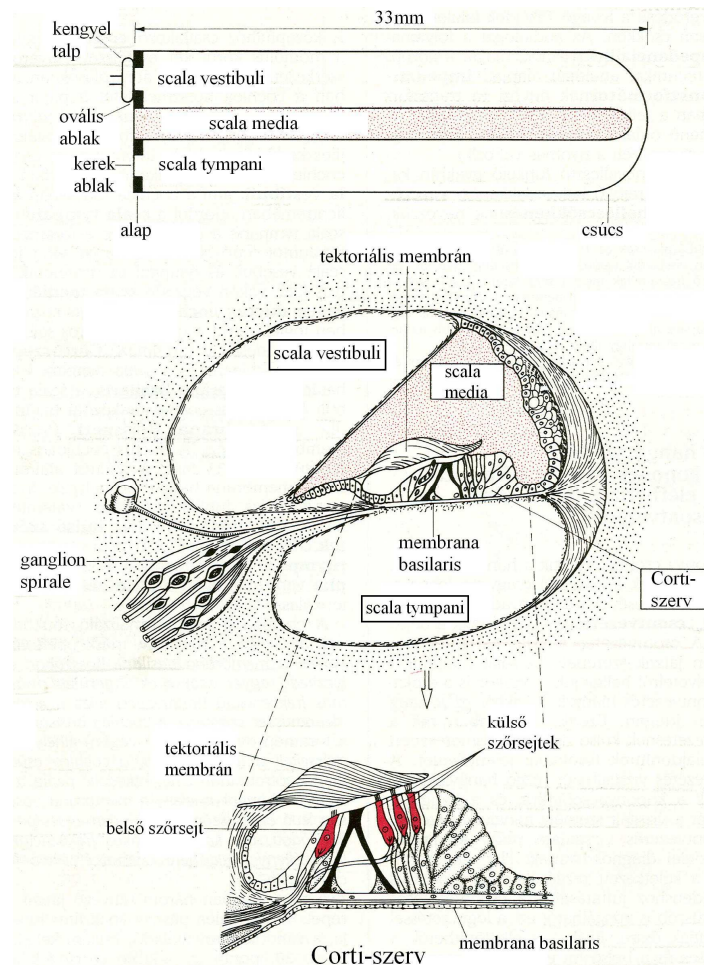
Az impedanciaillesztés során a levegőrezgés mintegy **22-szeres erősítést** kap a **kalapács-üllő-kengyel** által kifejtett emelőhatásnak köszönhetően. Az így felerősített jel már képes a belső fülben érzékelhető folyadékrezgésként tovaterjedni az ovális ablakból kiindulva.

\*Kiegészítésként elmondható, hogy a hangok nem csak a dobhártya közvetítésével, hanem a koponyaacsontok rezgése által is eljuthatnak a belső fülbe. Mivel beszéd közben a koponyaacsontok rezonátorként működnek, saját beszédhangjaink két úton juthatnak el a csigába, így lehet az, hogy másnak halljuk saját beszédhangjainkat, mint egy külső személy. Ez az oka annak is, hogy gyakran idegennek tűnik, pl. a rögzített beszédhangunk visszahallgatása.

#### **5.2.4. A hallás perifériás mechanizmusai/A belső fül felépítése**

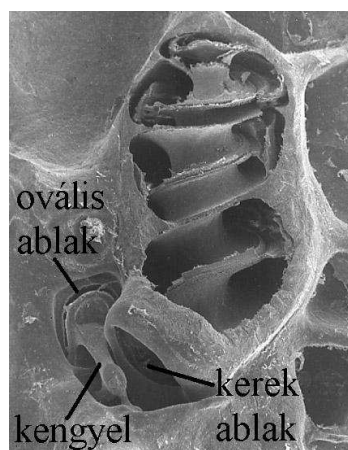
A belső fülben található a **csiga** (*cochlea*). A csiga belső ürege három csatornára oszlik, melyek egymás felett „emeletszerűen” helyezkednek el. A folyadékrezgések az ovális ablaktól a **scala vestibuli**-ban terjednek a csiga csúcsa felé. Itt a scala vestibuli megszakítás nélkül folytatódik a **scala tympani**-ban, mely visszavezet a csiga alapjához és a **kerek ablak**nál ér véget (5-9. ábra és 5-10. ábra).





5-9. ábra: A csiga három belső üregének elhelyezkedése és a Corti-szerv felépítése

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 916. oldal, 37-13. ábra alapján/



5-10. ábra: A csiga elektronmikroszkópos képe

A scala vestibuli és a scala tympani közrefogja a csiga középső üregét a **scala mediát**, mely a hallás receptorzónáját a **Corti-szervet** tartalmazza (5-9. ábra). A Corti-szerv a scala tympanit és a scala mediát elválasztó **membrana basilarison** fekszik. Ezen találhatóak a három sorban fekvő külső-, és az egy sort alkotó belső **szőrsejtek**. A szőrsejtek közötti teret **támasztósejtek** töltik ki. A külső szőrsejtek a tetejükön lévő **csillókkal** (cilliumok) a föléjük hajló **tektoriális membránhoz** vannak rögzülve, míg a belső szőrsejtek csillói a scala media folyadékába nyúlnak. Mind a külső-, mind a belső szőrsejtek alapjuknál szinapszt képeznek a **ganglion spirale** bipoláris neuronjaival, melyek a **hallóideget** alkotva a szőrsejtekben keletkezett ingerületeket továbbítják az agytörzs felé (részletesen ld. lejjebb).

#### **5.2.5. A hallás perifériás mechanizmusai/A belső fül működése**

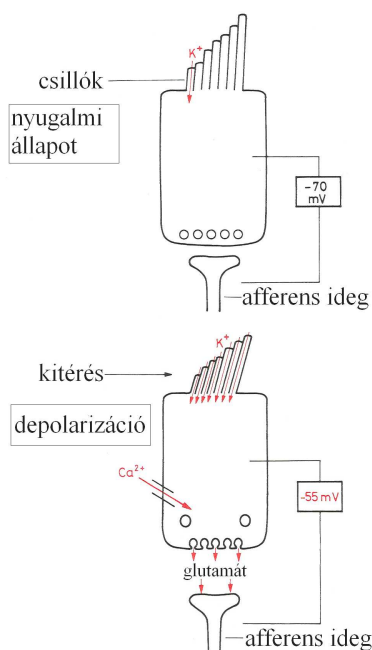
A csiga a benne terjedő folyadékrezgéseket frekvencia (hangmagasság) és intenzitás (hangerő) szerint **analizálja**. A folyadékrezgéseket a Corti-szervben lévő szőrsejtek elektromos jelekké alakítják (mechanoelektromos transzdukció). Az így létrejött akciós potenciálok végül a hallóideg és a hallópályák közvetítésével jutnak el a hallókéregbe, ahol a hallásérzet kialakul (5-11. ábra).

A hangok által keltett folyadékrezgések a membrana basilarison ún. **vándorlóhullámokat** hoznak létre. A membrana basilaris a csiga alapjánál keskeny és feszes, míg a csiga csúcsánál széles és laza. Ennek köszönhetően a magas hangok a csiga alapjánál térítik ki legjobban a membránt, míg a mély hangok a csiga csúcsánál

A nyugalmi helyzetéből kimozduló membrana basilaris „magával húzza” a tektoriális membránhoz csillóikkal kapcsoló külső szőrsejteket. A külső szőrsejteken a mechanikus inger (a csillók kitérése) hatására  $K^+$ -csatornák nyílnak és  $K^+$  áramlik be a sejtbe. A beáramló  $K^+$ -kationok depolarizálják a külső szőrsejteket (**mechanoelektromos transzdukció**, 5-11. ábra). A depolarizáció hatására átalakul a külső szőrsejtek belső szerkezete, csillóik elmozdulnak és magukkal „húzzák” a tektoriális membránt (**elektromechanikus transzdukció**). A külső szőrsejtekben tehát először mechanikus ingerek alakulnak elektromossá majd fordítva: a kialakult elektromos változás (depolarizáció) mechanikai folyamatot indukál. Ezt a kettős hatást nevezzük aktív

**bidirekcionális transzdukciós mechanizmusnak.** A külső szőrsejtek hatására elmozduló tectoriális membrán már a belső szőrsejteket is ingerületbe hozza, melyek hasonlóan mechanoelektromos transzdukcióval válaszolnak (5-11. ábra). A külső szőrsejtek tehát „felerősítik” a *membrana basilarison* terjedő vándorlóhullám hatását, így lehetővé teszik a belső szőrsejtek számára a hanghullámok csúcsainak pontosabb detektálását. A **frekvenciaanalízis** során ekképpen magas hangot hallunk akkor, ha a csiga alapjánál lévő belső szőrsejtek jönnek ingerületbe, míg mélyet, ha a csiga csúcsán elhelyezkedők.

Az ingerületbe jövő szőrsejtek **glutamát** neurotranszmittet ürítenek az alattuk elhelyezkedő szinaptikus részbe (5-11. ábra), mely az afferens idegvégződéseken akciós potenciálok kialakulásához vezet. A **hangerő** (intenzitás) kódolása: ha erősebb a hallott hang, akkor nagyobb mértékben depolarizálnak a szőrsejtek, így több transzmittet ürítenek, mely végül az afferens idegvégződéseken kialakuló akciós potenciálok számát megnöveli.



5-11. ábra: A szőrsejtek mechanoelektromos transzdukciója

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 921. oldal, 37-19. ábra alapján/

### 5.2.6. A hallás centrális mechanizmusai

Az afferens idegvégződéseken kialakuló akciós potenciálokat a ganglion spirale bipoláris neuronjai a hallóideget (**VIII. agyideg**) alkotva vezetik tovább az agy felé. A hallóideg az agytörzsi **nucleus cochlearis**-ba jut. Az innen kiinduló axonok a **középagyba** jutnak, ahonnan több átkapcsolás után az azonos oldali vagy az ellenoldali **talamusz CGM** (*corpus geniculatum mediale*) magjába jut az ingerület. Végül a CGM-ből a **primer hallókéregbe** (Brodmann 42) kerül az információ, mely a **halántéklebenyben** található. A csiga, a nucleus cochlearis, és a hallókéreg bizonyos részei **tonotóp** vetülésűek, azaz a különböző magasságú hangoknak meghatározott helyük van. Az érzékszervek közül a hallás pályái a legösszetettebbek, többek közt a hangirány meghatározásának bonyolultsága miatt.

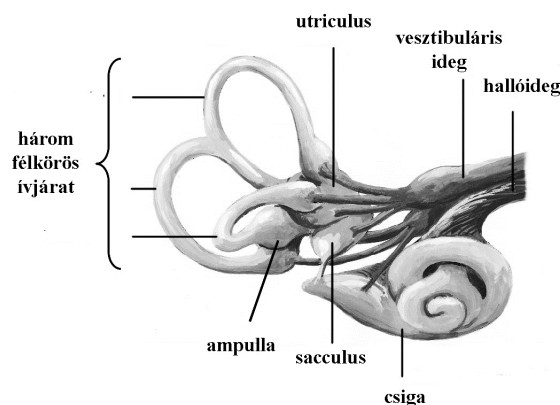
## 5.3. Helyzetérzékelés

### 5.3.1. A helyzetérzékelés szerve

A belső fülben a csiga mellett helyezkednek el a tér mindhárom irányába egy-egy ívet rajzoló **félkörös ívjáratok** (5-12. ábra). Mindegyik ívjárat az utriculus-ból indul ki és oda is tér vissza. Kiszélesedő részüket **ampullának** nevezzük, itt találhatóak azok a receptormezők, melyek a **fej szöggyorsulását** (elfordulását) detektálják. Az **utriculus**-ban és a hozzá kapcsolódó **sacculus**-ban helyezkedik el az **otholitszerv**, mely a **lineáris gyorsulást** és a **fej térbeli helyzetét** érzékeli.

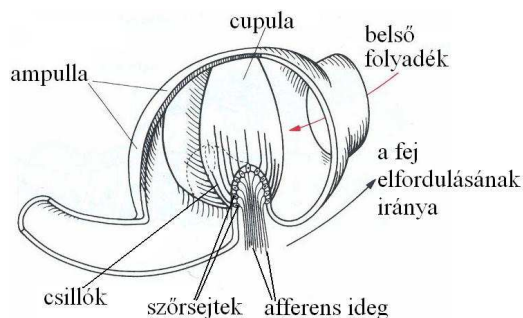
### 5.3.2. A fej szöggyorsulásának detektálása

A fej elfordulásának hatására a félkörös ívjáratokban lévő **belső folyadék**, tehetetlensége miatt az ellenkező irányba mozdul el. Az elmozduló folyadék az ampullában található kocsonyás szerkezetű **cupulát eltorzítja**. A cupulába nyúlnak a szőrsejtek csillói, melyek a folyadék elmozdulásával egyező irányba kitérnek (5-13. ábra). A csillók kitérése mechanoelektromos transzdukciót okoz, hasonlóan a Corti-szervnél leírtakhoz. Az afferens idegen akciós potenciálok alakulnak ki, és végül az információ a vestibuláris ideg közvetítésével az agytörzsi vestibuláris magokhoz jut.



5-12. ábra: A belső fül a csigával és a félkörös ívjáratokkal

1. utriculus, 2. félkörös ívjáratok, 3. sacculus, 4. ampulla, 5. csiga, 6. vestibuláris ideg, 7. hallóideg



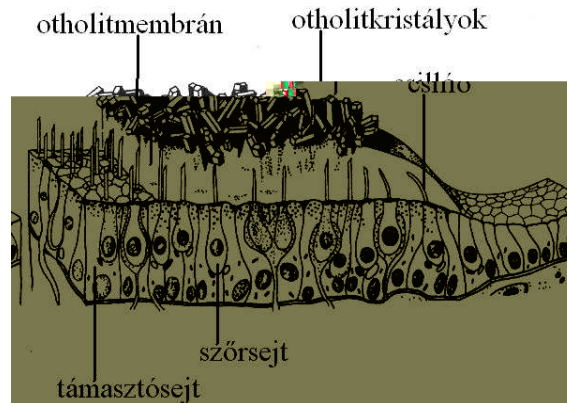
5-13. ábra: A fej elfordulásának érzékelése

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 853. oldal, 35-18. ábra alapján/

### 5.3.3. A lineáris gyorsulás- és a fej térbeli helyzetének detektálása

Az utriculusban és a sacculusban elhelyezkedő otholitszerv képes érzékelni a lineáris gyorsulást, pl. liftben érezzük a lift gyorsulását vagy lassulását. Illetve érzékeli a fej térbeli helyzetét, pl. csukott szemmel is képesek vagyunk meghatározni a le és a fel irányokat. Az otholitszervben hasonló működésű szőrsejtek találhatók, mint az ampullákban, azzal a különbséggel, hogy csillók nem cupulába, hanem egy hasonlóan

kocsonyás szerkezetű **otholitmembránba** nyúlnak (5-14. ábra). Az otholitmembrán erőhatásra bekövetkező torzulását a rajta fekvő **otholitikristályok** ( $\text{CaCO}_3$ ) tehetetlensége vagy súlya okozza.



5-14. ábra: Az otholitszerv

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 854. oldal, 35-19. ábra alapján/

#### 5.3.4. Hová jut a helyzetérzékeléssel kapcsolatos információ?

Mind a három ampullából, mind az otholitszervekből érkező információ a **vesztibuláris idegen** keresztül hagyja el a belső fület. A helyzetérzékeléssel kapcsolatos információk az agytörzsben elhelyezkedő **vesztibuláris magokhoz**, ill. közvetlenül a kisagyba futnak (lásd 3.6. fejezet). A vesztibuláris magok sok agyterülettel kapcsolatban állnak és a helyzet- és egyensúlyérzékelés mellett a **testtartás** kialakításában is részt vesznek, ezért szerepüket a következő fejezetben (lásd 6.1. fejezet) elemezzük részletesebben.

## 6. Magasabb rendű idegi működések

### 6.1. Az izomtónus és a testtartás szabályozása

#### 6.1.1. A vesztibuláris magok működésének vázlata

A helyzetérzékeléssel kapcsolatos információk a félkörös ívjáratokból a négy agytörzsi vesztibuláris magba (*nucleus vestibularis lateralis (Deiters mag), superior, inferior, medialis*) jutnak. E magoknak az egyensúlyérzékelés információinak továbbítása mellett fontos szerepük van az izomtónus és a testtartás kialakításában. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk főbb feladataikat.

##### A/ Nucleus vestibularis medialis és superior:

- **nyakizmok** tónusának beállítása,
- külső szemizmok reflexes irányítása: adott pont fixálása a fej elmozdulásakor. Ezek az ún. **vestibuloocularis reflexek (VOR)**, a *nucleus vestibularis superior* a helyzetérzékelési információkat a szemmozgató izmok agytörzsi magvaihoz juttatja (III., IV., VI. agyidegek magvai).

##### B/ Nucleus vestibularis inferior:

- a helyzetérzékelési információkat továbbítja a felsőbb agykérgi központok felé, ahol **tudatosul** a fej és a test térbeli helyzete,
- a **kisagynak** (lásd 3.6. fejezet) szolgáltat egyensúlyérzékelési információkat.

##### C/ Nucleus vestibularis lateralis (Deiters-mag):

- a Deiters-magból indul ki a **tractus vestibulospinalis** gerincvelői leszálló pálya,
- ez a pálya A $\alpha$ -motoneuronokra kapcsol a gerincvelőben, ezáltal **fokozza az izomtónust**, főleg a végtag és törzs feszítő (extenzor) izmain,
- kisagyi **Purkinje sejtek gátolják** a Deiters-magot, ha ez a gátló bemenet megsérül, akkor erősödik aktivitása, az izomtónus fokozódik, melynek következtében a testtartás merevebb lesz.

#### 6.1.2. A Deiters-mag és a formatio reticularis közös szerepe

Az agytörzsi **formatio reticularis** a Deiters-maghoz hasonlóan a gerincvelő leszálló pályáin (**tractus reticulospinalis**, keresztül szintén fokozza az extenzor izmok

működését. A Deiters-magtól eltérően azonban, a formatio reticularis nem kap bemenetet a félkörös ívjáratokból. A két agyterület együttesen alakítja ki az ébrenléti állapotra jellemző „merev” izomtónust, mely a gerincvelői reflexek (lásd 3.4. fejezet) segítségével meghatározza testtartásunkat. Álló testhelyzetben a láb és a törzs, míg ülő testhelyzetben főleg a törzs feszítő izmainak szabályozott működése teszi lehetővé az egyensúlyi testtartás kivitelezését. E rendszerek hibás működése megnehezíti a finom, pontos mozdulatok kivitelezését, főleg eszközhasználat közben.

A Deiters-magnak és a formatio reticularisnak mindemellett szüksége van gátló bemenetekre is. Ezek a gátló bemenetek csökkentik a két agyterület aktivitását, mivel a Deiters-mag és a formatio reticularis önmagukban túlzott serkentést fejtenének ki a feszítő izmokra. Ezek a **gátló bemenetek** a következők:

- kisagyi Purkinje sejtek (csak a Deiters-magot),
- agykéreg,
- középagyi vörösmag (*nucleus ruber*).

Ha a gátló területek egyike megsérül, akkor a normálisnál merevebb izomtónus jön létre. Például agykéreg sérülések esetén az alsó végtag izomtónusa fokozódik (**dekortikációs rigiditás**). Ugyanez történik akkor is, ha a gátló területeket a Deiters-maggal vagy a formatio reticularissal összekötő pályák sérülnek meg. Például macskánál a Deiters-mag és a nucleus ruber közti kapcsolat megszüntetése után, az izomtónus annyira fokozódik, hogy az altatott macska megáll a lábain. Ezt **decerebrációs rigiditásnak** is nevezzük, a jelenség első leírója (Sherrington) pedig egyszerűen: „az állás karikatúrájának” nevezte.

\*Kiegészítés: az extenzor izmokat (törzs és végtagok feszítő izmai) szokás még antigravitációs izmoknak is nevezni, mivel a fekvő testhelyzettel ellentétben, ülő vagy álló testhelyzet esetén húzódnak össze, így a gravitációs erő irányával ellentétes erőt kifejtve, megtartják a talajtól elemelkedett test súlyát.

## 6.2. Féltekei dominancia

Az ember bal és jobb agyféltekéje nem teljesen szimmetrikus sem anatómiailag sem működésében. A **beszédközpontok**, melyek a nyelv kódolását végzik, jobbkezes emberek esetén csaknem mindig a **bal agyféltekében** foglalnak helyet. Balkezes egyének mintegy 70%-ának, a jobbkezesekhez hasonlóan szintén a bal agyféltekében vannak a



beszédközpontjai, míg maradékuknál a jobb oldalon helyezkednek el. A bal agyfélteke tehát általában dominál a jobb felett, gyakran még balkezes emberek esetén is. Ez azzal magyarázható, hogy a féltekei dominancia és a kézdominancia nem ugyanakkor alakul ki a magzati fejlődés során. Újabb kutatások szerint, a féltekei dominancia magzati kialakulásának egyik oka a jelenlévő **tesztoszteron**. Fiú magzatokban, a nagyobb mennyiségű tesztoszteron, jobban gátolja a bal agyfélteke fejlődését, ezért fiúk között több lesz a jobb agyfélteke domináns és így nagyobb lesz a balkezesek száma is. Ez lehet az egyik oka annak is, hogy a fiúk gyakran később tanulnak meg beszélni, mint a lányok. Kutatások szerint, a tesztoszteron másik hatása, az immunrendszer fejlődésének akadályozása, így lehetséges az, hogy a pubertáskorú fiúk között több az asztmás megbetegedés valamint, hogy a balkezes fiúk között kimutathatóan több az allergiások száma.

A beszéd és az írás képességei mellett, a hangulatok és az **érzelme**k is féloldali megosztottságot mutatnak. Jobb agyfélte domináns egyéneknél, több a depresszióra és a szorongásra hajlamosak száma. Ennek az a magyarázata, hogy a jobb agyfélteke feladata a környezeti hatások „megfigyelése” és veszély esetén, a félelmi reakciók beindítása. Ha valakinél a jobb agyfélteke dominál, akkor kevésbé veszélyes szituációkban is félelmi reakció indul be, amely szorongáshoz vagy depresszióhoz vezethet. Jobb féltekei dominancia másodlagosan is kialakulhat, pl. a bal agyféltekét ért sérülések következtében.

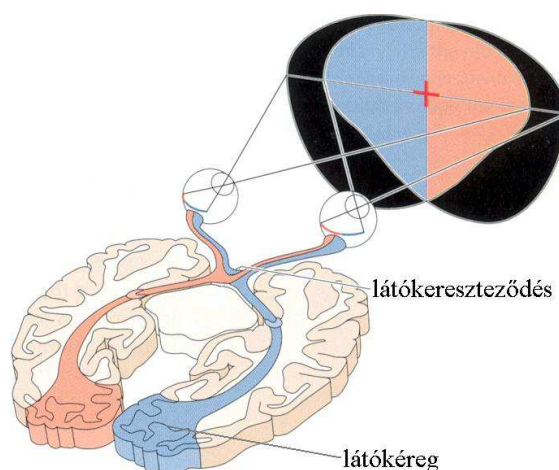
A bal agyfélteke főleg a racionális, logikus gondolkodásért felelős, míg a jobb inkább az intuitív, kreatív, „művészi”, elvont gondolatok kiindulópontja. Ezen tulajdonságok erősen kihathatnak a tanulási folyamatokra és az egyén kommunikációjára. Bal agyfélteke domináns egyedek logikai úton jönnek rá a problémák megoldására, kommunikációjuk általában könnyen érthető, logikus. Ezzel szemben jobb oldali dominancia esetén, az emberek intuitívan közelítik meg a problémákat, a megoldásokhoz nem lépésről-lépésre, hanem megérzésszerűen jutnak el. Nyelvi kommunikációjuk viszont gyakran nehézkes, akadozó, keresik a megfelelő szavakat.

### 6.3. Hasított agyi vizsgálatok

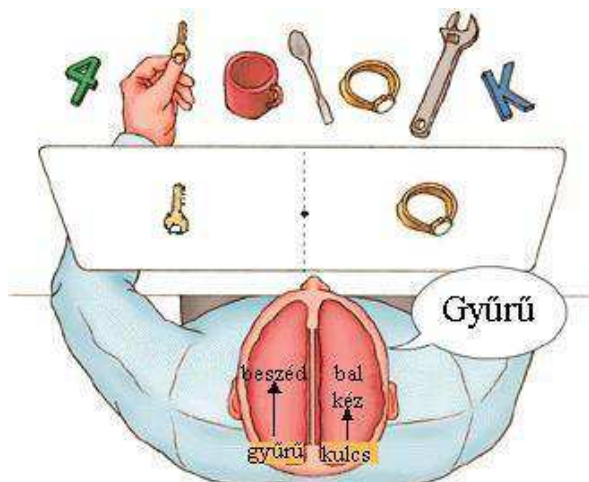
A féltekei dominanciával kapcsolatos vizsgálatok és az azokból eredő tapasztalatok, gyakran olyan egyénekből származtak, melyeknél **átvágták a kérgestestet**, azaz megszüntették a kapcsolatot a jobb és a bal félteke között. Az ilyen vizsgálatokat nevezzük hasított agyi, vagy **”split-brain”** vizsgálatoknak. Főleg epilepsziás betegek terápiája során került erre sor, mert így meg tudták akadályozni a görcsrohamok, így a mozgásképtelenség mindkét testfélre való kiterjedését.

A látás folyamata során (lásd 5.1. fejezet) a jobb látótérből érkező információ, a látókereszteződés segítségével, a bal oldali látókéregbe jut, és fordítva (6-1. ábra). A kérgestest közreműködése miatt azonban a kétoldali látókéreg oda-vissza kapcsolatban állnak egymással, így mindkét oldalról érkező látóinformáció végső soron leképeződik mindkét féltekében. A kérgestestet átmetszve, ezt az oda-vissza kapcsolatot megszüntetjük, következésképpen speciális vetítőberendezéssel lehetőség nyílik arra, hogy a jobb oldalra vetített kép csak a páciens bal agyféltekéjébe jusson és fordítva.

Mivel a legtöbb esetben a bal féltekében van a beszédközpont, a jobb oldalra vetített tárgyakat a kísérleti személy gond nélkül megnevezi, bal kézzel azonban a letakart tárgyak közül tapintás segítségével kiválasztani nem tudja. Ezzel ellentétben a bal oldalra vetített tárgyakat megnevezni nem tudja, viszont az eléje tett tárgyak közül bal kézzel kiválasztja (6-2. ábra).



6-1. ábra: A látókereszteződés működése



6-2. ábra: A hasított agyi vizsgálatok sémája

## 6.4. Tanulás és memória

### 6.4.1. Egyszerű és összetett tanulási formák

Az egyszerű (nem asszociatív) tanulási formák közé tartozik a **habituáció** (megszokás) és a **szenzitizáció**. E két tanulás elsajátításához nem szükséges ingertársítás, mint az összetett (asszociatív) tanulási formáknál. Habituációról akkor beszélünk, ha valamely ingerre adott válaszreakció erőssége csökken. Például, ha egy csiga mászik egy deszkalapon, a deszkalapra ráütve (inger), a csiga visszabújik a házába (válasz), mert az erős rezgést és hangot fenyegetőnek véli. Többször megismételve a deszkalapra ütést, az állat felismeri, hogy a fenyegető ingerhez nem társul fájdalominger. Így egyre kevésbé, végül egyáltalán nem húzódik vissza a házába, megtanulja, hogy az inger nem veszélyes. Létrejön a megszokás. De mondhatnánk a mondásokból ismert, farkast kiáltó fiú esetét is, aki már hiába kiáltott segítségért sokadszorra, mikor valóban megjelent a farkas, már senki nem sietett a segítségére. A habituációval ellentétes nem asszociatív tanulási forma a szenzitizáció, mely során egy adott ingerre adott válaszreakciók erőssége nő. Például, a csigas példánál maradva, egy valós fájdalominger ismételt alkalmazása esetén, a menekülési reakció (házba húzódás) ideje folyamatosan csökken.

Az összetett (asszociatív) tanulási formák, különböző **ingerek társítását** igénylik, melyeket három csoportba sorolhatjuk: feltételes reflex, operáns (instrumentális) tanulás és belátásos tanulás. **Feltételes reflex** kialakítása, vagy más néven klasszikus kondicionálás során, valamely külső ingert (pl. egy hangot) társítunk egy öröklötten jelenlévő feltétlen reflexszel (pl., hogy a táplálék látványa nyáleválasztást okoz). A feltételes reflex feltétele a társítás elég számú ismétlése (megerősítés). Ha ez megtörténik, kialakul a feltételes reflex és az élőlény végül már az önmagában alkalmazott külső kondicionáló ingerre (hang) is válaszol (nyáleválasztás).

A feltételes reflex kialakulásának vázlata, Pavlov kutyás kísérleteinek példája alapján:

1. FELTÉTLEN REFLEX:

belső inger (táplálék látványa) → válasz (nyáleválasztás)

2. TÁRSÍTÁS:

külső kondicionáló inger (hang) + belső inger → válasz

3. FELTÉTELES REFLEX:

külső kondicionáló inger → kondicionált válasz

4. MEGERŐSÍTÉS:

a társítás ismétlése

A tanulás megtartásához szükséges a társítások folyamatos ismétlése (megerősítés), ha ez nem történik meg egy idő elteltével kioltás alakul ki, mely után az élőlény már nem válaszol a kondicionáló ingerre.

Az **operáns (instrumentális) tanulás** első leírói Skinner és Thorndike voltak. Kísérleteikben az állatot (pl. patkány), egy ún. operáns viselkedési dobozba (Skinner-box) helyezték, ahol egy pedál lenyomására ital, vagy étel jutalmat kapott. Az állat felderítő mozgásai során véletlenszerűen lenyomta a pedált. Többszöri véletlen sikeres próbálkozás után, az élőlény agyában összetársítja a motoros mozgulatot a jutalommal, majd ezután már szándékosan nyomja le a pedált. Az állat tehát véletlenszerű múltbéli cselekedeteiből választja ki a konzekvensen sikerre vezetőket, és ezeket később tudatosan

alkalmazza a jutalom elnyerése érdekében. Érdekes példa az operáns tanulás mibenlétének megmutatására az emberi babonák keletkezése. Ha egy dolgozatot ötösré írunk meg kedvenc piros tollunkkal, legközelebb is mindenképp azzal a tollal szeretnénk dolgozatot írni. Ilyenkor tulajdonképpen hibás társítás jön létre, mely során a jutalmat (ötös érdemjegy), nem a sok tanulással, hanem a piros tollal társítjuk össze. Az operáns tanulás fejlettebb, a pavlovi kondicionálásnál, mert az állat maga végzi el az ingerek társítását, ill. általában akaratlagos mozgást kell végeznie a jutalom elnyerése érdekében.

A harmadik asszociatív tanulási forma a **belátásos tanulás**. Főleg főemlősökre és emberre jellemző, de eszközhasználó alacsonyabb rendű állatoknál is megfigyelhető. Az operáns tanulástól annyiban különbözik, hogy az élőlény nem múltbeli eseményeket vizsgál, hanem tudatosan tervezi el jövőbeni cselekedeteit, a feltételezett siker érdekében. Szükséges hozzá a korábban megtanult ismeretek új kombinációban való alkalmazása és általában eszközhasználat is. Pl. ketrecbe zárt majom elé banán jutalmat helyezünk el olyan távolságban, hogy azt ne érje el. Ha egy elég hosszú botot helyezünk be a ketrecébe, a majom rájön, hogy a bottal meghosszabbíthatja kezét és így elérheti a banánt.

#### **6.4.2. A memóriafajták csoportosítása**

Emlékek képződése minden tanulási forma elengedhetetlen feltétele. Többféle módon csoportosíthatjuk a memóriafajtákat. Első csoportosításunk a **memória időtartama szerint** tesz különbséget. Ilyen szempontból elkülönítünk **rövid távú** (primer) memóriát, mely néhány percre, esetleg óráig rögzíti az eseményeket, illetve **hosszú távú** memóriát, mely évekig, esetleg egész életen át képes tárolni az emléknymokat. A jelentőséggel bíró memóriatartalmak és az ismételt eseményekhez rögzült emlékek, a rövid távú memóriából átkerülnek a hosszú távú memóriába, míg a felesleges emlékek törlődnek. A rövid távú memóriát használjuk akkor, amikor írni tanulunk, majd elég számú ismétlés után, ha már kialakultak a szükséges motoros képességek, akkor ezek átkerülnek a hosszú távú memóriába. Megkülönböztetünk még **tercier hosszú távú memóriát** is, ahol a nagyon alapvető személyes memóriatartalmak rögzülnek (név, születési idő stb.). Ezek máshogyan rögzülnek, mint a szekunder hosszú

távú emlékek, és gyakran a súlyos memóriavesztéssel járó események után is megmaradnak.

A memória fajtáit csoportosíthatjuk **működésük szerint** is (6-1. táblázat). **Implicit** (reflexív, nem deklaratív) memóriának nevezzük a megtanult képességeket (skills). Ezek nem verbalizálható emlékeket képeznek az agyban, vagyis nem a képesség szavakkal való felidézése a fontos, hanem a képesség gyors, automatikus elvégzése, verbális támogatás nélkül. Az implicit memória lehet rövid- és hosszú távú is. A rövidtávú memória általában időlegesen tárolódik a talamusz és az agykéreg oda-vissza ható öningerlő neuron köreiben (reverberációs körök). Ezt használjuk írástanulás során is. A rövidtávú implicit memóriát veheti igénybe a habituáció és a szenzitizáció is, azonban mindkettő hosszú távúvá is válhat, ha a habituáló vagy a szenzitizáló inger időben nem változik. Hosszú távú implicit memóriába tartoznak még az asszociatív tanulási formák és a megtanult automatikus mozgások is, melyek memóriatartalmai az amigdalával (érzelmek), a motoros agykéreggel, a kisaggyal (mozgásvezérlés), a striátummal és a bazális ganglionokkal vannak kapcsolatban. Érdekes módon a hippocampusnak nincs különösebben jelentős szerepe az implicit memória tárolásában.

\*Kiegészítés: hosszú távú agykéreg által tárolt implicit memória a priming is, amely pl. akkor tapasztalható, ha egy elfelejtett szó hirtelen eszünkbe jut (beugrik), amint a szó kezdőbetűjét megtudjuk.

Az **explicit** (deklaratív) memória, az implicithez képest elmondható, verbalizálható emléknyomokat tárol (tudás). Ilyenek pl. a múltbeli tények, ill. események. Az implicittel ellentétben, az explicit memóriatartalmak rögzüléséhez nem szükséges ismétlés, egyszeri alkalom is elég a hosszú távú memóriába való kerüléshez. Ez természetesnek tekinthető, mivel szerencsére emlékszünk olyan eseményekre is, melyek csak egyszer történtek meg velünk, sőt, ha ez az alkalom érzelmi tartalmakat hordozott, akkor a rögzülés esélye biztosabb, mint a többször ismétlődő, jelentéktelen eseményeké. Az explicit emlékekhez ennek megfelelően mindig társul értékelés (jó vagy rossz emlékek). Kialakulásukhoz elengedhetetlen a temporális lebenyben lévő hippocampusz működése. A hippocampusz kódoló, vezérlő működése hozza létre a hosszútávú explicit emlékeinket, míg az emlékek tárolásában az agykéregnek van döntő szerepe. Ha a hippocampusz sérül, anterográd amnézia alakulhat ki, pl. hippocampusz-írtott epilepsziás

betegeknél. Ilyenkor a sérülés időpontja előtti eseményre emlékszik a beteg, de a sérülés után újabb hosszú távú memóriaképei nem képződnek. Az anterográd amnézia az élet végéig megmarad. Az agykéreg, vagy az agykérget és a hippocampuszt összekötő pályák sérülése esetén, pl. agyrázkódás miatt, retrográd amnézia alakul ki. Ez abban nyilvánul meg, hogy a sérülés előtti, már rögzült emlékek „esnek ki”. A köznyelvben ezt az állapotot nevezik amnéziának. A retrográd amnézia a pályák axonjainak esetleges sikeres regenerációja után megszűnhet, az emlékek visszatérhetnek.

MEMÓRIA (2)	
IMPLICIT (REFLEXÍV, DEKLARATÍV)	EXPLICIT (DEKLARATÍV)
-nem verbalizálható	-verbalizálható
-kéességek „skills”	-tudás „knowledge”
-rövid és hosszú távú	-hosszú távú
-nem asszociatív tanulás (rövid és hosszú távú) -asszociatív tanulás (hosszú távú) -automatikus mozgások (hosszú távú) -priming (hosszú távú)	-tények: szemantikus memória -események: epizodikus memória
-gerinctelenekre és gerincesekre is jellemző	-főleg főemlős és ember
-automatikus felidézés	-akaratlagos felidézés
-ismétlés szükséges	-egyetlen alkalom elég a rögzüléshez
-nincs értékelés	-van értékelés (jó vagy rossz emlékek)
-agykéreg: priming, rövidtávú memória -amigdala: emocionális asszociatív	-hippocampusz (temporális lebeny): kódolás -agykéreg: tárolás

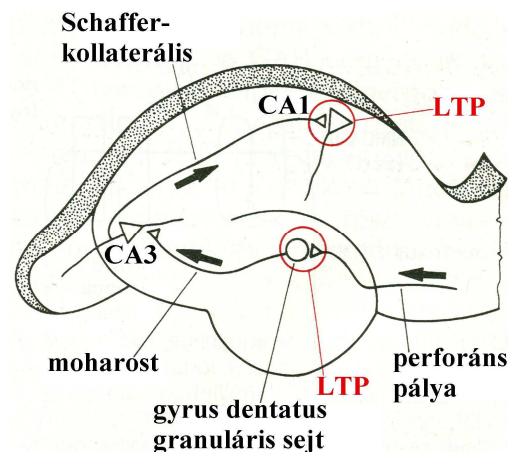
tanulás -motoros kéreg, kisagy, striátum, bazális ganglionok: skills, mozgásos asszociatív tanulás, automatikus mozgások -talamusz: reverberációs körök, rövidtávú memória -hippokampusz szerepe kevésbé fontos	
-ha a fent említett agyterületek sérülnek: -tanulási folyamatok sérülnek -mozgási funkciók sérülnek -rövidtávú memória sérül	1.hippokampusz sérülés: -anterográd amnézia 2.pályák sérülései: -retrográd amnézia 3.agykéreg sérül: -retrográd amnézia

6-1. táblázat: A memóriafajták csoportosítása működésük szerint

#### 6.4.3. A hosszú távú memóriaképződés sejtes alapja

A hosszú távú memória sejtes alapjairól kialakított tudományos nézetek a mai napig nem tisztultak le. Az azonban bizonyos, hogy a hippokampusz és azon belül is egyes sejtjeinek **hosszú távú potenciálódása** (long term potentiation, **LTP**) részt vesz a hosszú távú szekunder explicit memória kialakulásában. A hippokampusz szerkezetét a 6-3. ábrán figyelhetjük meg, míg a memóriaképződéshez szükséges információk áramlását a 6-4. ábra mutatja.

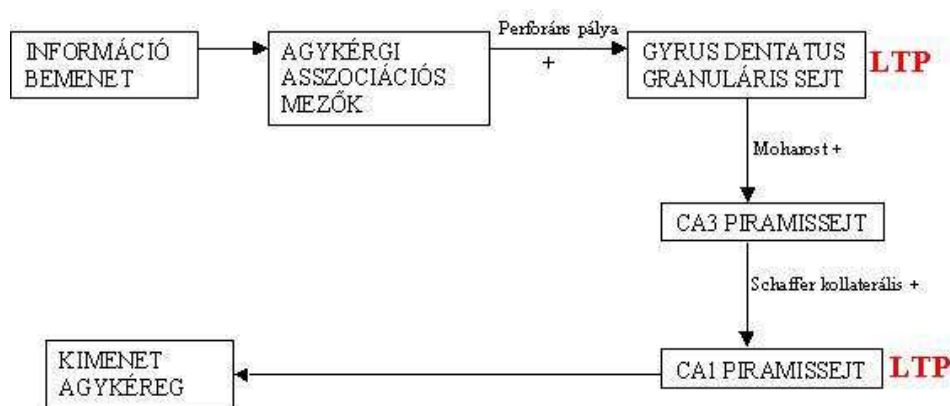




6-3. ábra: A hippocampus szerkezete

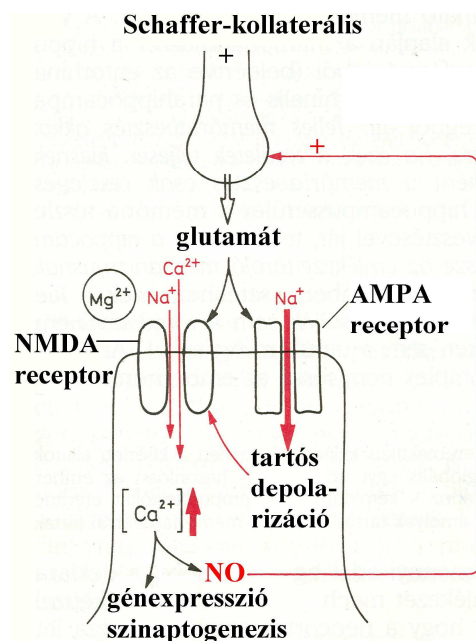
/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 987. oldal, 38-14. ábra alapján/

A hippocampuson belül a **gyrus dentatus granuláris sejtjeiben** és a **CA1** régió piramis sejtjeiben képződik LTP, melynek hatására percekig vagy órákig megváltozik az említett sejtek elektromos állapota. Ennyi idő elegendő arra, hogy az egyszer megtapasztalt esemény emléknymoi fizikai változást hozzanak létre a hippocampusban és az agykéregben. Fizikai változás alatt az LTP hatására képződő új szinapszisokat értjük (szinaptogenezis), melyek kialakulását axon- és dendritnövekedés előz meg. Új szinaptikus kapcsolatok jönnek létre az idegsejtek között, és feltételezhetően ezek működése képez le egy-egy emléknymot a hosszú távú memóriában. Újabb elméletek szerint azonban egyes extracelluláris fehérjék (pl. a prionfehérjék) is részt vehetnek az LTP-által kiváltott hosszú távú memória rögzítésében.



6-4. ábra: Az információáramlás útja a hosszútávú explicit memória kialakulása során

A hippocampális LTP kialakulását a 6-5. ábrán figyelhetjük meg. A **Schaffer-kollaterális** beérkező ingerület **glutamát** neurotranszmittert szabadít fel a szinaptikus részbe. A glutamát a CA1 régió piramissejtjeinek **AMPA**-típusú glutamát receptorain depolarizációt okoz ( $\text{Na}^+$  beáramlás), majd a tartós depolarizáció hatására az **NMDA**-receptorok üregét eddig „eltömítő”  $\text{Mg}^{2+}$ -ionok elhagyják a receptor csatornáját. Az ily módon kinyílni képes NMDA-receptorokon beáramló  $\text{Na}^+$ - és  $\text{Ca}^{2+}$ -ionok létrehozzák a hosszú távú potenciációt, mely órákra megnöveli a sejt ingerlékenységét, ill. sok sejten beüli (intracelluláris) biokémiai folyamatot indít be (pl.  $\text{Ca}^{2+}$ -szint növekedést). Az LTP hatására egyéb enzimatiszus folyamatok-, **génexpresszió** és **szinaptogenezis** indulnak be. A posztszinaptikus sejtől végül nitrogén-monoxid (**NO**) szabadul fel, ami visszahatva a preszinaptikus sejtre, megnöveli a kiürülő glutamát mennyiségét.



6-5. ábra: Az LTP kialakulása

/Forrás: Fonyó, Az orvosi élettan tankönyve, 1999., 988. oldal, 38-15. ábra alapján/

## 7. Tesztkérdések

1. Mit nevezünk motoros egységnek?
2. Mit jelent a „közös végső pálya” elve?
3. Sorolja fel a szarkomer részeit!
4. Sorolja fel az izom-kontrakcióban szerepet játszó fehérjéket (minimum négyet).
5. Mit nevezünk elektromechanikai kapcsolásnak a harántcsíkolt izom esetén?
6. Sorolja fel a triád részeit!
7. Ismertesse a troponin, tropomiozin fogalmát, elhelyezkedését!
8. Milyen alegységekből épül fel a troponin molekula?
9. Mi a troponin I molekula szerepe?
10. Mi a troponin C molekula szerepe?
11. Mi a troponin T molekula szerepe?
12. Ismertesse a csúszó-filamentum modell lényegét!
13. Mit jelent a glikolízis fogalma?
14. Mit jelent a béta-oxidáció fogalma, mi a jelentősége?
15. Sorolja fel az izomrosttípusokat, jellemezze a fáradásuk szerint!
16. Mi különbség a fehér és vörös izom anyagcseréje között?
17. Sorolja fel az izomkontrakciók típusait!
18. Jellemezze az izotóniás összehúzódást!
19. Jellemezze az izometriás összehúzódást!
20. Jellemezze az auxotóniás összehúzódást!
21. Mit jelent a motoros véglemmez fogalma?
22. Definiálja a dermatóma fogalmát!
23. Sorolja fel a neuron részeit!
24. Csoportosítsa a neuronokat funkció alapján!
25. Csoportosítsa a neuronokat nyúlványszámuk alapján!
26. Nevezzen meg a gliasejtek funkciói közül minimum kettőt!
27. Írja fel a GHK egyenletet!

28. Nevezze meg az akciós potenciál felszálló szárában (depolarizáció) szerepet játszó iont!
29. Mi a feszültségfüggő ioncsatorna működésének lényege?
30. Ismertesse a Na/K pumpa működését!
31. Nevezze meg, hogy az idegsejt mely részén keletkezik az akciós potenciál!
32. Mit jelent az EPSP fogalma?
33. Mit jelent az IPSP fogalma?
34. Nevezze meg az ingerület vezetés két fő típusát!
35. Hogyan befolyásolja az axon átmérője az axoplazma ellenállását és ingerületterjedés sebességét
36. Sorolja fel az idegrost-típusokat Erlanger-Gasser beosztása szerint!
37. Mondjon példát elektromos szinapszisa emberben!
38. Nevezze meg az ideg-izom szinapszis ingerületátvivő anyagát!
39. Milyen enzim hatástalanítja a neuromuszkuláris junkcióban az acetilkolin?
40. Milyen típusú receptor található az ideg-izom szinapszisban?
41. Mondjon példát serkentő és gátló ingerületátvivő anyagra!
42. Mondjon észter típusú neurotranszmittert!
43. Sorolja fel a receptorcsaládok két fő típusát!
44. Mi okozza a harántcsíkolt izom halál utáni rigorállapotát?
45. Mely szervünk detektálja a fej helyzetét és lineáris gyorsulását?
46. Mi a gamma motoneuronok ( $\gamma$ -efferensek) szerepe?
47. Mi az mPFC szerepe a mozgásszabályozásban?
48. Hol található a Purkinje sejt? Mi a szerepe?
49. Mit jelent az adekvát inger kifejezés?
50. Mit jelent a receptív mező fogalma?
51. Nevezze meg a motoneuronok két legfontosabb típusát!
52. Sorolja fel a bőr mechanoreceptorait!
53. Sorolja fel a gerincvelő részeit!
54. Nevezze meg a legpontosabban, hogy hol találhatóak a mozgató neuronok sejttestei a gerincvelőben?
55. Nevezze meg a legpontosabban, hogy hol találhatóak az érző neuronok sejttestei?

56. Mit jelent a reflexív fogalma? Nevezze meg a részeit!
57. Mondjon példát propioceptív reflexre!
58. Mondjon példát exteroceptív reflexre!
59. Sorolja fel sorrendben a patella reflexben szerepet játszó struktúrákat! Kezdje a receptor felől!
60. Hol található a Golgi-féle ínorsó? Mi a szerepe?
61. Nevezze meg az inverz miotatikus reflex receptorát!
62. Miért nevezzük a talamuszt a `tudat kapujának`?
63. Mi az a motoros homunculus?
64. Mit jelent, hogy a primer motoros kéreg szomatotópiás vetülésű?
65. Sorolja fel az agykéreg rétegeit!
66. Nevezze meg az agyhártyákat!
67. Nevezze meg a legpontosabban, hogy hol található a szomatomotoros kéreg!
68. Nevezze meg a legpontosabban, hogy hol található a primer hallókéreg!
69. Nevezze meg a legpontosabban, hogy hol található a primer látókéreg!
70. Definiálja a sulcus és a gyrus fogalmát!
71. Mely típusú mozdulatokért felelős a piramispálya?
72. Mely típusú mozdulatokért felelős az extrapiramidális pályarendszer?
73. Mi a premotoros area feladata?
74. Mi a szupplementer motoros area feladata?
75. Mi a poszterior parietális agykéreg legfontosabb feladata?
76. Sorolja fel a három legfőbb agykérgi mozgásszabályozó területet!
77. Sorolja fel a kisagy funkcióit!
78. Mi a kisagyi modul? Rajzolja le vázlatosan!
79. Sorolja fel a bazális ganglionokat!
80. Nevezze meg a Parkinson-kór három fő tünetét!
81. Rajzolja le a hurokpályák közvetlen útját (talamusz nyitás)!
82. Rajzolja le a hurokpályák közvetett útját (talamusz zárás)!
83. Mi a Huntington-kór tünete?
84. Sorolja fel az extrapiramidális gerincvelői leszálló pályákat!

85. Mit jelent a vesztibuláris érzékszerv esetén a `mechanoelektromos transzducer` kifejezés?
86. Mely ion beáramlása okozza a vesztibuláris érzékszerv depolarizációját!
87. Sorolja fel az agytörzsi vesztibuláris magokat!
88. Mi a Deiters mag szerepe?
89. Rajzolja le a sarcomerhossz és a relatív feszülés közötti összefüggés grafikonját!
90. Mely izomrostokat nevezünk intrafuzálisnak?
91. Mely izomrostokat nevezünk extrafuzálisnak?
92. Mely látótérből érkezik információ a bal agyféltekéhez?
93. Nevezze meg az egyszerű tanulási formákat!
94. Soroljon fel négy összetett tanulási formát!
95. Hol található az otholitszerv, mi a feladata?
96. Mit jelent a dekortikációs rigiditás?
97. Mit jelent a decerebrációs rigiditás?
98. Mit nevezünk diszinhibíciónak vagy gátlásoldásnak?
99. Sorolja fel az agyidegeket!
100. Milyen csont-összeköttetési típusokat ismer?

## 8. Felhasznált irodalom

1. Ángyán L. Az emberi test mozgástana, Motio Pécs, 2005.
2. Berne RM, Levy MN. Principles of Physiology (Third edition) Mosby, 2000.
3. Csoknya M. Az idegrendszer összehasonlító morfológiája, Dialóg Campus, Pécs, 1998.
4. Csoknya M, Wilhelm M. A sportmozgások biológiai alapjai I. Dialóg Campus, Pécs, 2006.
5. Csoknya M, Hernádi I. Az emberi szervezet felépítése és működése, PTE, 2009.
6. Dickhuth H. Sportélettan, sportorvostan, Dialóg Campus, 2000.
7. Edwards WH. Motor Learning and Control, From Theory to Practice, Wadsworth Cengage Learning, 2011.
8. Fonyó A. Ligeti E. Az orvosi élettan tankönyve, Medicina, 2008.
9. Fonyó A. Az orvosi élettan tankönyve, Medicina, 1999.
10. Frenkl R. Sportélettan, Budapest, TF, 2000.
11. Ganong WF. Az orvosi élettan alapjai, Medicina, 1990.
12. Hall JE. Gayton and Hall Textbook of Medical Physiology (Twelfth Edition), Saunders, 2010.
13. Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, Siegelbaum SA, Hudspeth AJ. Principles of Neural Science (Fifth Edition), McGraw-Hill Companies, 2012.
14. Levitan IB, Kaczmarek LK. The neuron, Cell and Molecular Biology (Third Edition), Oxford University Press, 2002.
15. Nolte J. The Human Brain. An Introduction to Its Functional Anatomy (Fourth Edition), Mosby, 1999.
16. Pavlik G. Élettan-sportélettan, Medicina, 2011.
17. Pocock G, Richard CD. Human Physiology (Third edition), Oxford University press, 2006.
18. Rohen JW, Yokochi C, Lütjen-Drecoll E, Chung KW. Color Atlas of Anatomy (Seventh edition), Lippincott Williams & Wilkins, 2011.

19. Schmidt RA, Lee T. Motor Control and Learning (Third Edition), Human Kinetics Publishers, 2004.
20. Schmidt RA, Wrisberg CA. Motor Learning and Performance (Third Edition), Human Kinetics Publishers, 2004.
21. Snell RS. Clinical Neuroanatomy (Sixth Edition), Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
22. Squire LR. Fundamental Neuroscience (Third Edition), Elsevier, 2008.
23. Szentágothai J, Réthelyi M. Funkcionális anatómia, Medicina, 1989.
24. Withers PC. Comparative Animal Physiology (First Edition), Saunders, 1992.